

# **SISTEMA DE ASISTENCIA A LA PROPULSIÓN PARA SILLAS DE RUEDAS CONVENCIONALES**

**SOFÍA GONZÁLEZ ESTRADA**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniero biomédico**

**Ms. Sergio López Isaza**



**UNIVERSIDAD EIA  
INGENIERÍA BIOMÉDICA  
ENVIGADO  
2019**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A mi familia, y a mis amigos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PRELIMINARES.....	14
1.1 Planteamiento del problema .....	14
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos del proyecto .....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos .....	17
1.4 Marco de referencia.....	18
1.4.1 Antecedentes .....	18
1.4.2 Marco teórico.....	25
2. METODOLOGÍA.....	34
2.1 Diseñar el sistema mecánico que permita la propulsión de SRM mediante la metodología de diseño de producto de Ulrich y Eppinger.....	34
2.1.1 Encuestas.....	34
2.1.2 Contextualización en el mercado.....	34
2.1.3 Identificar las necesidades del usuario .....	35
2.1.4 Establecer especificaciones objetivo .....	35
2.1.5 Análisis de funciones .....	35
2.1.6 Alternativas de solución.....	35
2.1.7 Selección de concepto.....	35
2.1.8 Diseño en detalle.....	36

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2	Diseñar el sistema de control para el soporte en la propulsión de SRM. ....	36
2.2.1	Identificación de la planta .....	36
2.2.2	Selección del controlador .....	37
2.2.3	Diseño del controlador.....	38
2.3	Verificar el diseño del sistema mecánico y de control mediante simulaciones. ..	39
2.3.1	Simulación de la respuesta del controlador .....	39
2.3.2	Evaluación del desempeño y de la estabilidad del controlador .....	39
2.3.3	Simulación por elementos finitos de los sistemas mecánicos .....	39
2.3.4	Comprobación general del diseño .....	39
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	40
3.1	Diseñar el sistema mecánico que permita la propulsión de SRM mediante la metodología de diseño de producto de Ulrich y Eppinger.....	40
3.1.1	Encuestas.....	40
3.1.2	Contextualización en el mercado.....	44
3.1.3	Identificar las necesidades del usuario .....	47
3.1.4	Establecer especificaciones objetivo .....	49
3.1.5	Análisis de funciones.....	50
3.1.6	Alternativas de solución.....	51
3.1.7	Selección de concepto.....	54
3.1.8	Diseño en detalle.....	57
3.2	Diseñar el sistema de control para el soporte en lapropulsión de SRM. ....	65
3.2.1	Identificación de la planta .....	65
3.2.2	Selección del controlador .....	68
3.2.3	Diseño del controlador.....	68

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.3	Verificar el diseño del sistema mecánico y de control mediante simulaciones ...	71
3.3.1	Simulación de la respuesta del controlador .....	71
3.3.2	Evaluación del desempeño y de la estabilidad del controlador .....	73
3.3.3	Simulación por elementos finitos de los sistemas mecánicos .....	74
3.3.4	Comprobación general del diseño .....	76
4.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	79
	REFERENCIAS .....	80
	ANEXO 1. ENCUESTA – SILLA DE RUEDAS.....	88
	ANEXO 2. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN .....	91

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Error en estado estacionario según el tipo de sistema y su entrada (Duarte, n.d.). .....	33
Tabla 2. SRM en Colombia.....	44
Tabla 3. Sillas de ruedas eléctricas en Colombia. Características básicas. ....	45
Tabla 4. Sillas de ruedas eléctricas en Colombia. Características electromecánicas. ....	46
Tabla 5. Sistemas de propulsión. Características básicas. ....	46
Tabla 6. Sistemas de propulsión. Características electromecánicas. ....	47
Tabla 7. Lista de necesidades del usuario. ....	48
Tabla 8. Especificaciones objetivo. ....	49
Tabla 9. Matriz morfológica.....	52
Tabla 10. Criterios de selección.....	54
Tabla 11. Matriz de puntuación.....	55
Tabla 12. Concepto solución. ....	56
Tabla 13. Partes del SAP diseñado. ....	59
Tabla 14. Variables en el cálculo de requisitos de los motores. ....	62
Tabla 15. Características del motor. ....	63
Tabla 16. Cumplimiento de requerimientos iniciales. ....	77

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Rueda Magic Wheels (Homestead, 2018).....	18
Figura 2. Magic Wheels de doble aro (Provail, 2016b).....	19
Figura 3. Sistema de ventaja de movilidad para SRM (Patent No. US8087684B2, 2012). .....	19
Figura 4. Vista general del sistema (Patent No. US7837210B2, 2010). .....	20
Figura 5. Sistema de transmisión (Patent No. US7837210B2, 2010). .....	20
Figura 6. Instalación del Nudrive Air (Langhoej, 2012).....	21
Figura 7. Cambio de transmisión del Nudrive (Langhoej, 2012).....	21
Figura 8. Silla de ruedas con E-Fix (Alber, n.d.).....	22
Figura 9. SmartDrive, pulsera PushTracker y aplicación móvil (Permobil, 2018).....	23
Figura 10. SmartDrive instalado en una SRM (Max Mobility, 2018). .....	23
Figura 11. Power Pack Plus (Teyder, 2019).....	24
Figura 12. Instalación del Power Pack Plus (Teyder, 2019).....	24
Figura 13. Solo Power Pack (TGA Mobility, 2019). .....	24
Figura 14. Duo Power Pack (TGA Mobility, 2019).....	24
Figura 15. Silla para exteriores rurales (WHO et al., 2008). .....	25
Figura 16. Silla para interiores y exteriores (WHO et al., 2008).....	25
Figura 17. Tipos de sillas de ruedas según requerimientos posturales (WHO et al., 2008). .....	26
Figura 18. SRE a) para interiores (Ortopedia Viva, 2017) y b) plegable (ReActiv, 2019)..	27
Figura 19. Partes de una SRM (Hospital de Torre Vieja, 2018). .....	27
Figura 20. Esquema simple de un sistema (Duarte, n.d.).....	30

Figura 21. Diagrama de bloques de un sistema de segundo orden (Ogata, 2010).....	30
Figura 22. Diagrama de bloques de la planta Gp(s) controlada y retroalimentada. ....	31
Figura 23. Respuesta del sistema a un escalón unitario (Ogata, 2010). ....	32
Figura 24. Diagrama del programa de Labview. ....	37
Figura 25. Diagrama de bloques simplificado. ....	38
Figura 26. Velocidad máxima ideal de una SRE (encuesta). ....	40
Figura 27. Peso máximo ideal soportado por una SRE (encuesta). ....	40
Figura 28. Inclinação máxima ideal soportada por una SER (encuesta). ....	41
Figura 29. Peso propio máximo ideal de un SAP (encuesta). ....	42
<i>Figura 30. Rango de precios ideal de un SAP, (encuesta).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31. Duración de la batería de un SAP (encuesta). ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 32. Independencia de la batería de un SAP (encuesta). ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 33. Interfaz de un SAP, resultado de la encuesta. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34. Tiempo de instalación de un SAP, resultado de la encuesta.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 35. Disponibilidad en Colombia de las partes de un SAP, resultado de la encuesta. ....</i>	<i>44</i>
Figura 36. Caja negra para el sistema de propulsión. ....	50
Figura 37. Caja transparente para el sistema de propulsión. ....	51
Figura 38. SAP diseñado. ....	57
Figura 39. Vista superior del SAP abierto. ....	60
Figura 40. Vista isométrica del SAP abierto. ....	60
Figura 41. Diagrama del SAP acoplado a una SRM, mostrando variables de interés. ....	61
Figura 42. Configuración de los piñones.....	62
Figura 43. Motor DCX26L GB KL 12V con motorreductor GPX26HP 231:1.....	63

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 44. Vista lateral del SAP acoplado a una SRM. ....	64
Figura 45. Vista superior del SAP acoplado a una SRM. ....	64
Figura 46. Vista isométrica del SAP acoplado a una SRM.....	65
Figura 47. "Control loop" del programa de Labview para identificación. ....	66
Figura 48. Creación de gráfica y archivo.....	66
Figura 49. Velocidad del motor según la variación del ciclo de trabajo. ....	67
Figura 50. Modelos construidos en System Identification.....	67
Figura 51. Diagrama de bloques del sistema con controlador.....	68
Figura 52. Diagrama de bloques para el sistema discretizado. ....	71
Figura 53. Respuesta de Gp al escalón unitario. ....	72
Figura 54. Respuesta de Gdlc al escalón unitario. ....	72
Figura 55. "Control loop" del programa de Labview para evaluación del controlador. ....	73
Figura 56. Control de la velocidad del motor en Labview. ....	74
Figura 57. Análisis de esfuerzos en el SAP. ....	75
Figura 58. Punto de mayor esfuerzo en el SAP. ....	76
Figura 59. Análisis de desplazamientos en el SAP. ....	76

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Encuesta – Silla de ruedas .....	88
Anexo 2. Alternativas de solución .....	91

## RESUMEN

Las sillas de ruedas son tecnologías de asistencia, y como tal, permiten a quienes las usan acceder y disfrutar de sus derechos como seres humanos. Sus usuarios varían en edad, ocupación, nivel de actividad, condición de salud, estatus socio-económico, entre otros. Como consecuencia, hoy existe una gran variedad de estas, que busca satisfacer las diferentes necesidades, preferencias y limitaciones de los interesados.

Las sillas de ruedas eléctricas, por ejemplo, son preferidas por usuarios con mayor limitación motriz por su fácil control, pero tienen desventajas como su gran tamaño, peso y precio. Las manuales son más compactas, fáciles de reparar, resistentes, económicas, y promueven la actividad física. Sin embargo, su desplazamiento depende del usuario en todo momento, desencadenando posibles patologías de las articulaciones involucradas que lleven a limitaciones adicionales y situaciones de discapacidad secundarias.

Por lo anterior, se diseñó un sistema de asistencia a la propulsión para sillas de ruedas manuales, que apoye el movimiento cuando el usuario lo necesite, en especial en terrenos difíciles. Así, se podría reducir potencialmente el desgaste de las articulaciones causado por el uso de estos sistemas de movilidad, mientras se mantienen muchas de sus ventajas.

Primero, se diseñó un sistema mecánico con la metodología de diseño de producto de Ulrich y Eppinger, a partir de una serie de necesidades descubiertas por medio de entrevistas y revisiones de los productos relacionados en el mercado. Luego, se planteó un sistema de control de la velocidad que guía el movimiento de la parte electromecánica. Se diseñó un controlador PI con la ayuda de Labview y las herramientas MuPAD y System Identification de MATLAB®.

Por último, se analizó el comportamiento del sistema mecánico mediante simulaciones por elementos finitos, para garantizar una estructura resistente y estable. También se simuló la respuesta y evaluó el comportamiento del controlador con el objetivo de verificar el diseño realizado.

Se llegó, entonces, al diseño preliminar de un sistema de asistencia a la propulsión, un producto que podría mejorar la movilidad, evitar lesiones y fomentar la participación laboral, social y cultural de usuarios de silla de ruedas manual. Futuras aproximaciones a este trabajo podrían hacerse con miras a traducirlo en un producto real, analizar su desempeño con un prototipo físico y realizar los ajustes necesarios.

**Palabras clave:** sillas de ruedas, sistemas de propulsión, sistemas de control, movilidad personal, ayudas técnicas.

## **ABSTRACT**

Wheelchairs are assistive technologies; they allow those who use them to access and enjoy their rights as human beings. Its users vary in age, occupation, activity level, health condition, socio-economic status, and other characteristics. Therefore, today there is a wide variety of these devices seeking to meet the different needs, preferences and limitations of those interested.

For instance, electric wheelchairs are preferred by users with greater motor limitations due to their easy control, but they have disadvantages such as their size, weight and price. Manual wheelchairs are more compact, easy to repair, resistant, cheap, and promote physical activity. However, they need to be propelled by the user at all times, which can lead to pathologies of the joints involved, causing additional limitations and secondary disabilities.

Therefore, a propulsion assistance system for manual wheelchairs is proposed, with the objective of supporting its movement when the user finds it necessary, especially in difficult terrains. Thus, the joint wear caused by the prolonged use of these mobility systems could potentially be reduced, while maintaining many of their advantages.

First, a mechanical system was designed using the product design methodology of Ulrich and Eppinger, based on a series of needs and requirements discovered through interviews and reviews of related available products. Then, a speed control system was proposed to guide the movement of the electromechanical section. A PI controller was designed using Labview and, MuPAD and System Identification tools from MATLAB®.

Finally, the behavior of the mechanical system was analyzed by finite element analysis, to ensure a stable and resistant structure. The controller's response and performance were also evaluated in order to verify its design.

The preliminary design of a propulsion assistance system was then proposed, a product that could improve the mobility, prevent injuries and promote the labor, social and cultural participation of manual wheelchair users. Future approaches to this work could be done with a view to translating it into a real product, analyzing its performance with a physical prototype and making the necessary adjustments.

**Keywords:** wheelchair, propulsion systems, control systems, personal mobility, access technology.

## INTRODUCCIÓN

Una silla de ruedas puede brindarle a su usuario beneficios en cuanto a su comodidad, movilidad, independencia, participación social y cultural, inclusión en actividades de deporte y recreación, integración a la vida laboral, y demás; pero sólo si esta es la adecuada.

Encontrar la silla de ruedas adecuada para cada individuo no es tarea fácil. Se deben considerar una gran variedad de factores, entre los que se encuentra el método de propulsión, manual o eléctrico. Las sillas de ruedas manuales (SRM) tienen cualidades que las hacen sobresalir en países de bajos recursos, ambientes exteriores, espacios limitados, y para usuarios activos. Sin embargo, el hecho de que el usuario tenga que impulsarse constantemente tiende a desgastar y generar lesiones en articulaciones como los hombros.

Con el objetivo de aprovechar las ventajas de las SRM mientras se minimiza el desgaste articular, se han propuesto diferentes elementos que modifican el método de propulsión. Los sistemas electromecánicos de asistencia a la propulsión, como el que se propone en el presente trabajo, son uno de estos.

A continuación, se expone el diseño de un sistema de asistencia a la propulsión (SAP) para SRM, con elementos electromecánicos y un sistema de control.

En la sección 1, *Preliminares*, se plantea y da contexto al problema en cuestión, se expone su importancia, situación actual y los posibles beneficios de la solución propuesta. En el *Marco de Referencia*, se exponen los conceptos básicos sobre los que se trabaja a lo largo del escrito, y se muestran algunos sistemas ya existentes creados con el fin de apoyar el desplazamiento de SRM. Luego se enuncian los objetivos del proyecto.

En la sección 2, *Metodología*, se exponen los métodos, herramientas y softwares usados para lograr cada objetivo. En la sección 3, *Presentación y discusión de resultados*, se analizan los resultados obtenidos para cada objetivo, y se muestra el diseño final del sistema electromecánico, el de control y sus respectivas simulaciones o pruebas.

Por último, en la sección 3, *Conclusiones y consideraciones finales*, se discuten los resultados logrados, y se exponen algunas consideraciones para tener en cuenta en futuros trabajos similares o para mejorar el presente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

# 1. PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las sillas de ruedas son tecnologías de asistencia, y como tal, ayudan a quienes las usan a acceder y disfrutar de la totalidad de sus derechos como seres humanos (Borg et al., 2012; OMS, 2016; Toro, Eke, & Pearlman, 2015). Se trata de una herramienta necesitada por aproximadamente 65 millones de personas, el 1% de la población mundial (OMS, 2016), para ser más independientes en sus actividades diarias, incluyendo individuos con parálisis cerebral, lesión de la médula espinal, espina bífida, amputaciones, entre otros (Bray, Yeo, Noyes, Harris, & Edwards, 2016; Finley & Rodgers, 2014).

Existen principalmente dos tipos de sillas de ruedas de uso cotidiano, no atlético, las manuales y las eléctricas. Las sillas de ruedas eléctricas (SRE) resultan útiles para usuarios con mayor limitación motriz, en especial respecto a la fuerza y estabilidad del tronco y miembros superiores. Su velocidad, frenado, arranque y dirección pueden ser controladas con poco esfuerzo por medio de dispositivos como joysticks (Ding & Cooper, 2005). Algunos inconvenientes incluyen sus altos precios, su tamaño, su uso dependiente de factores ambientales y de la superficie, sus elevados tiempos de fabricación y entrega final, entre otros (Algood, Cooper, Fitzgerald, Cooper, & Boninger, 2005; Evans, Frank, Neophytou, & de Souza, 2007). Además, como estas no requieren ningún tipo de impulso de parte del usuario, dependen de una fuente de alimentación, normalmente una batería, lo que incrementa sus costos de compra y mantenimiento.

Las sillas de ruedas manuales o convencionales (SRM), por otro lado, se destacan por ser más compactas, fáciles de reparar y mantener, versátiles, resistentes a más terrenos y condiciones, y mucho menos costosas. Por esto, son preferidas por personas de diversos países, condiciones sociales, estratos económicos y capacidades motrices. Además, estas implican una mayor actividad física, la cual está fuertemente relacionada a la salud mental y física, estado de ánimo y sociabilidad de sus usuarios (Dallmeijer, van der Woude, Janssen, & Veeger, 2001; Tolerico et al., 2007; Van der Woude, de Groot, & Janssen, 2006).

No obstante, el usuario debe impulsar la SRM en todo momento, de su fuerza y movilidad dependen todas las etapas del movimiento, desde el arranque hasta el frenado. Esta labor se dificulta en terrenos como arena, pasto, grava, alfombras, pavimento con imperfecciones, resaltos, y rampas u otras superficies inclinadas tanto en subida como en bajada (DiGiovine et al., 2000; Koontz et al., 2005; Meyers, Anderson, Miller, Shipp, & Hoenig, 2002).

Koontz et al. (2005), encontró una diferencia significativa en la fuerza aplicada y el torque en la rueda en diferentes superficies. Esta fue mayor en el pasto, adoquines y rampas en comparación con pisos lisos de madera, baldosa y cemento. Asimismo, se evidenciaron diferencias en cada superficie en cuanto a la velocidad promedio, desaceleración entre impulsos y número de impulsos de propulsión del usuario.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Este esfuerzo constante para movilizarse en una SRM puede generar una serie de complicaciones, desde condiciones en la columna por la postura incorrecta, hasta patologías de las articulaciones involucradas en el movimiento. Una de las estructuras más afectadas es el hombro, evidenciado en los múltiples casos y estudios sobre el dolor en miembros superiores y detección de patologías del hombro en usuarios frecuentes de SRM (Boninger et al., 2005a; Curtis et al., 1995; Dallmeijer et al., 2001; Finley & Rodgers, 2014; Jordan, Sloan, & Saithna, 2018; Sie, Waters, Adkins, & Gellman, 1992).

Para dimensionar el problema, se debe tener en cuenta que, a partir de diversos estudios, se aproxima que los dolores o lesiones del miembro superior están presentes en el 50% de los usuarios de SRM con lesión de la médula espinal (Boninger et al., 2005a); el 55% de individuos con tetraplejia; y el 64% de los evaluados con paraplejia (Sie et al., 1992). También se estima que, alrededor del mundo, unas 20 millones de personas en situación de discapacidad no tienen acceso a sillas de ruedas adecuadas, lo que acaba por empeorar esta situación (Bray et al., 2016).

Además de estos riesgos para la salud, la falta de asistencia en la propulsión puede imponer límites al usuario de SRM en la realización de diferentes actividades cotidianas, afectar la percepción de su independencia personal y negarle oportunidades de participación social o laboral (Boninger et al., 2005b; Edberg & Persson, 2014; Jordan et al., 2018; Koontz et al., 2005).

Ahora, se han planteado diferentes soluciones a esta situación, desde recomendaciones de uso y técnicas de propulsión hasta sistemas o dispositivos que asistan en la propulsión de SRM (Algood et al., 2005; Boninger et al., 2005b; Broadhead & Hobson, 1998; Dallmeijer et al., 2001; DiGiovine et al., 2000; Húsűsű, 2001; Liű tiānpíng, 2014; Meyers et al., 2002; Van der Woude et al., 2006).

Esto muestra la necesidad de los usuarios de SRM de ser asistidos en ciertas etapas de la propulsión del dispositivo que usan como sistema de movilidad. Esta ayuda podría disminuir el desgaste de las articulaciones involucradas en el movimiento y brindar mayor comodidad al usuario de SRM, apoyando el desplazamiento en terrenos difíciles como los mencionados anteriormente o en otras situaciones donde se considere necesario.

De esta forma, se atenúan los efectos de la mayor desventaja de las SRM, mientras se mantienen muchas de sus ventajas como su versatilidad, fomento de la actividad física, promoción de la participación social y menor precio. Sin embargo, los sistemas de asistencia a la propulsión disponibles en el mercado no siempre son eficientes o ideales para todos los usuarios.

Algunos ofrecen una forma diferente de aplicar la fuerza sobre el aro de la rueda, como una palanca, lo que puede mejorar la postura, pero no disminuye significativamente el esfuerzo de parte del usuario (Patent No. US8087684B2, 2012). Otros brindan una ventaja mecánica que maximiza el torque ejercido sobre las ruedas, pero que muchas veces resulta ser insuficiente (Patent No. US7837210B2, 2010; Langhoej, 2012; Provail, 2016a). Por otro lado, muchos sistemas efectivos de propulsión para SRM disponibles están fuera del

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

presupuesto de la mayoría de los usuarios en el contexto colombiano, principalmente porque funcionan a base de motores y baterías sofisticadas que suelen ser costosas (Alber, 2019b; Max Mobility, 2018; Teyder, 2019; TGA Mobility, 2019).

Por lo tanto, se requiere un sistema de asistencia a la propulsión (SAP) para SRM que apoye el movimiento del usuario cuando este lo necesite, sin quitarle versatilidad a su silla, y con materiales de fácil adquisición, en este caso, en el medio colombiano.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Cuando una SRM es el principal método de movilidad personal para un individuo, el grado de independencia de este obedece a la integridad de sus miembros superiores y a su habilidad para moverse en todo tipo de terreno (Boninger et al., 2005b; Jordan et al., 2018; Koontz et al., 2005). Sus oportunidades para trabajar, estudiar, desplazarse, practicar deporte, o cocinar, pasan a estar limitadas por la fuerza y motricidad de los miembros superiores, destacando la importancia de evitar lesiones o dolores que comprometan su movimiento (Boninger et al., 2005b).

Al perder la capacidad de realizar actividades que antes eran cotidianas, se generan limitaciones secundarias a la original, agravando la situación de discapacidad en la que está la persona. Esto tiene efectos negativos sobre la autoestima del usuario, la generación de oportunidades de inclusión social, la manera en que se lleva a cabo esa interacción, y la participación en actividades placenteras, recreativas y laborales (Boninger et al., 2005b; Borg et al., 2012; OMS, 2016; Ripat & Woodgate, 2012; Toro et al., 2015).

Es importante destacar que el hecho de poder participar en la sociedad significa que la persona tiene nuevas oportunidades laborales, lo que le da mayor poder adquisitivo. Esto no sólo tiene un efecto positivo sobre su sensación de independencia, sino también sobre su bienestar general pues puede acceder a tecnologías, alimentos, servicios de salud u otros, de mejor calidad.

También en el aspecto económico, si el usuario evita complicaciones de salud luego de apropiarse de su SRM, este se ahorra el dinero que gastaría en futuras revisiones y procedimientos para corregirlas. Asimismo, se estaría ayudando a aliviar la carga sobre un sistema de salud saturado, evitando visitas recurrentes por patologías prevenibles. Esto ahorraría tiempo y dinero que podrían ser invertidos en la atención de más pacientes.

Continuando con los beneficios individuales, ya se ha demostrado que al apoyar la propulsión de las SRM, se reduce el esfuerzo que deben hacer sus usuarios, y con esto, los efectos incapacitantes que pueden surgir (Dallmeijer et al., 2001). Algood et al. (2005), reportaron que usando una silla de ruedas con asistencia de potencia activada por impulso manual (PAPAW, por sus siglas en inglés), el desplazamiento de los usuarios sobre

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



alfombras, rampas y curvas fue significativamente más fácil, tanto que hasta su ritmo cardíaco disminuyó.

Es así como un SAP para SRM no sólo evita las complicaciones de salud mencionadas, sino que brinda a su usuario beneficios sociales, laborales y personales, aumentando su calidad de vida. Además, le entrega a la sociedad un individuo más productivo, y se disminuye la carga sobre el sistema de salud y otras instituciones que prestan servicios asistenciales a personas en situación de discapacidad.

El diseño propuesto se limita a personas con la capacidad de impulsar su SRM independientemente, lo que requiere una fuerza suficiente en sus miembros superiores y control postural adecuado. El SAP, entonces, no planea convertir una SRM en una SRE por completo, sino brindar, como su nombre lo indica, una asistencia a la propulsión cuando el usuario lo considere necesario, por condiciones del terreno o preferencia personal.

El presente trabajo pretende sentar las bases para el desarrollo de un SAP que se acomoden a las necesidades, habilidades, y actividades de usuarios activos de SRM. Esto se logró realizando una revisión de sus requisitos y de productos disponibles actualmente, y proponiendo un diseño preliminar lo más completo posible que sirva como punto de partida para futuros desarrollos y mejoras.

## **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de asistencia a la propulsión para sillas de ruedas convencionales mediante elementos electromecánicos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar el sistema mecánico que permita la propulsión de SRM mediante la metodología de diseño de producto de Ulrich y Eppinger.
2. Diseñar el sistema de control para el soporte en la propulsión de SRM.
3. Verificar el diseño del sistema mecánico y de control mediante simulaciones.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 1.4 MARCO DE REFERENCIA

### 1.4.1 Antecedentes

Los SAP (o sistemas similares) ya existentes se pueden dividir en dos categorías principales: los mecánicos y los electromecánicos. Los primeros basan su funcionamiento en poleas, palancas y engranajes, mientras los segundos usan motores y baterías. Es importante hacer una revisión de estos dispositivos para tener una idea de los diferentes mecanismos que podrían emplearse en un SAP.

#### **Sistemas de propulsión basados en elementos mecánicos**

##### Magic Wheels:

Las Magic Wheels (Figura 1) son ruedas para SRM con un sistema de engranajes que permite una ventaja mecánica de 2:1 para disminuir el esfuerzo del usuario al desplazarse. Según un estudio independiente con fondos gubernamentales, su uso redujo el dolor en la articulación del hombro en un 55% en 20 semanas (Provail, 2016b).



*Figura 1. Rueda Magic Wheels (Homestead, 2018).*

El sistema de engranajes patentado provee dos cambios, como los de una bicicleta todoterreno, entre los que el usuario puede elegir moviendo el arco de la rueda hacia afuera o hacia adentro (Provail, 2016a). Los cambios son (Provail, 2016b):

- “High gear”: la SRM se comporta como una SRM con ruedas convencionales.
- “Low gear”: ventaja mecánica de 2:1, función Hill-holding (evita el deslizamiento hacia atrás entre impulsos) y función de freno asistido (reduce en un 50% la fuerza requerida para frenar al ir colina abajo).

La versión de Magic Wheels de doble aro (un aro extra por rueda) permite en total 4 cambios o velocidades, pues cada aro cuenta con un sistema de dos engranajes (Figura 2). Las Magic Wheels rempazan a las ruedas convencionales, son compatibles con la mayoría de modelos de SRM y cuentan con un botón de liberación rápida (Provail, 2016c). Adicionalmente, hay diferentes opciones de llanta y arco según las habilidades de agarre y empuje de cada usuario, agregan un peso extra de sólo 4.5 Kg por silla, no aumentan significativamente el ancho de la silla, ni impiden que esta se doble (Provail, 2016a).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 2. Magic Wheels de doble aro (Provail, 2016b)

### Sistema de ventaja en movilidad para SRM – Wheelchair advantage mobility system (US8087684B2)

Sistema de propulsión y freno que se acopla a varios modelos de SRM para facilitar su operación. Para impulsar su SRM, el usuario acciona la palanca, acercándola y alejándola de su cuerpo. Esto hace girar el disco delantero (Figura 3), que sólo lo hace en una dirección, garantizado el movimiento hacia delante de la SRM. Luego, la cadena transmite ese movimiento al disco trasero que hace girar la rueda de la SRM a la que está conectada (Patent No. US8087684B2, 2012).

Este dispositivo no ofrece una ventaja mecánica, la relación entre el torque aplicado por el usuario y el torque en la rueda es 1:1. Sin embargo, como las palancas están más cerca al usuario que los aros de las ruedas, y como su ubicación hace que sea más fácil y ergonómico ejercer fuerza sobre ellas, se disminuye el desgaste sobre las articulaciones del usuario, evitando dolores y patologías (Patent No. US8087684B2, 2012).

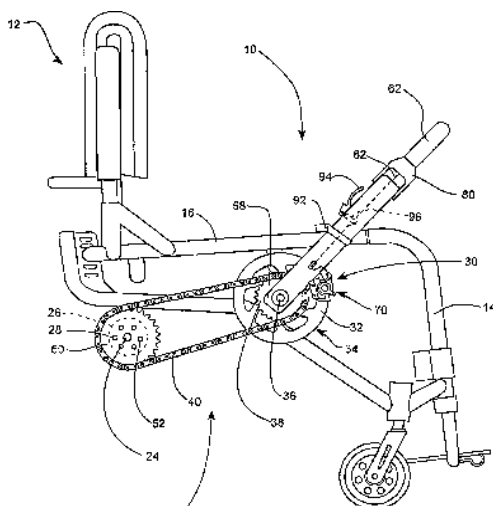


Figura 3. Sistema de ventaja de movilidad para SRM (Patent No. US8087684B2, 2012).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Sistema para la propulsión de SRM con palanca y sistema de transición - Wheelchair drive system with lever propulsion and a hub-contained transmission (US7837210B2)

Mecanismo de propulsión para SRM por medio de una palanca y un conjunto de engranajes que se alojan en un eje central, conectado al eje de la rueda. De forma general, su funcionamiento es similar al dispositivo anterior, pues en ambos casos el usuario mueve una palanca que transmite un torque a la rueda (Figura 4). Sin embargo, este sistema es mucho más complejo, y no usa cadenas. No sólo acerca al usuario el elemento que se debe empujar, sino que logra darle una ventaja mecánica que facilita la propulsión y disminuye la demanda sobre los miembros superiores.

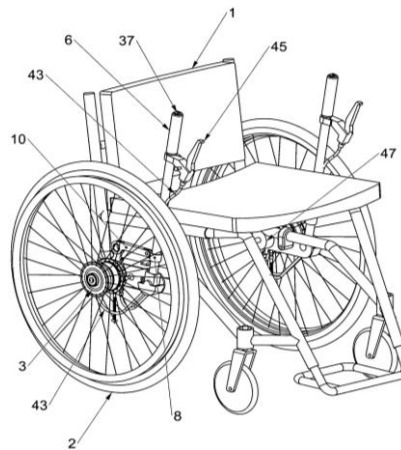


Figura 4. Vista general del sistema (Patent No. US7837210B2, 2010).

Además, todos sus componentes están contenidos en el mismo cilindro (Figura 5), lo que facilita la instalación y remoción del dispositivo. El usuario tiene acceso al controlador del embrague para elegir entre 3 modos o “cambios”: movimiento hacia adelante, hacia atrás o neutro. En este último, el SAP se desconecta de las ruedas, y el usuario puede impulsarse con el aro de forma convencional.

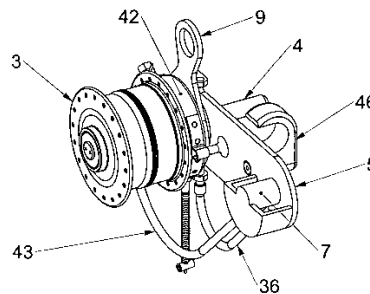


Figura 5. Sistema de transmisión (Patent No. US7837210B2, 2010).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### Nudrive Air

Nudrive Air fue creado por la empresa Langhoej con el propósito de ofrecer un método de propulsión con menos efectos adversos que el convencional. El dispositivo transmite el movimiento desde una palanca que acciona el usuario hasta el eje de la rueda. En esencia, es una versión mejorada y comercial de los dos modelos anteriores, con diferencias en la transmisión del movimiento, sus capacidades, y su estética de su diseño (Langhoej, 2012).

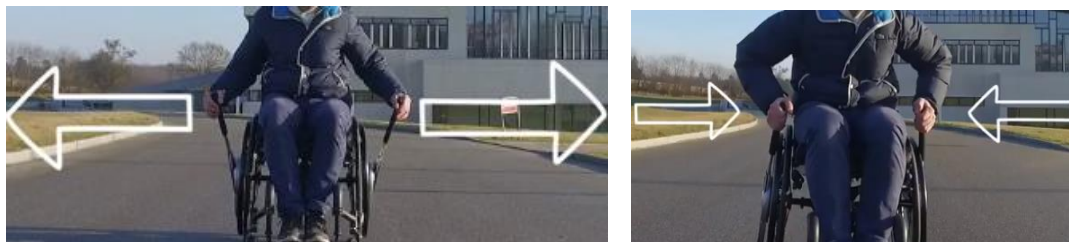
Nudrive Air puede ser acoplado a casi todos los modelos de SRM con ruedas de 22, 24 o 25 pulgadas de diámetro. Se instala usando un adaptador “Snap-Lock” que se fija a presión en la cara externa de la rueda sin afectar su estructura, como se observa en la Figura 6.



*Figura 6. Instalación del Nudrive Air (Langhoej, 2012).*

Langhoej (2012) afirma que, con Nudrive, un usuario de SRM puede:

- Moverse hacia adelante y atrás
- Frenar halando las palancas hacia la silla
- Cambiar entre neutro y drive empujando las palancas hacia afuera y rápidamente retornarlas a la posición inicial como muestra la Figura 7. En modo neutro, las palancas no hacen contacto con el sistema de transmisión.
- Reducir la fuerza necesaria para impulsarse hasta en un 40%
- Proteger y mejorar la higiene de sus manos y muñecas
- Reducir el riesgo de desgaste y lesiones articulares al cambiar las cargas



*Figura 7. Cambio de transmisión del Nudrive (Langhoej, 2012).*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## Sistemas de propulsión basados en elementos electromecánicos

### E-Fix

Sistema desarrollado por Alber que permite convertir una SRM en una eléctrica adaptando un kit de dos ruedas motorizadas, una unidad de control y una batería (Figura 8). Busca favorecer la independencia del usuario con una forma simple de facilitar su movilidad (Alber, 2019b).

Es compatible con casi todas las sillas manuales del mercado. Su montaje y desmontaje no requieren herramientas gracias al eje de extracción rápido patentado de las ruedas (que remplazan a las convencionales), el soporte de la unidad de control y un soporte para la batería ubicado debajo de la silla (Alber, 2019b).

Con un joystick se ajusta la velocidad entre 0.5 y 6km/h y se direcciona el movimiento. En total, el peso de todos los componentes no excede los 20 Kg (Alber, 2019a). E-Fix puede ajustarse a las necesidades del usuario con la adaptación de diferentes accesorios como palancas personalizadas o la opción E-Fix E36 que tiene más potencia, para personas que pesen más de 160 kg (Alber-USA, 2019).



*Figura 8. Silla de ruedas con E-Fix (Alber, n.d.).*

### Smartdrive

Dispositivo de asistencia eléctrica para SRM que permite subir rampas, desplazarse largas distancias y sobre superficies complicadas, con el objetivo de cuidar la parte superior del cuerpo de los usuarios, especialmente reduciendo dolores como el de hombro.

El usuario controla el dispositivo con el brazalete PushTracker, cuyas funciones se pueden personalizar con una app (Figura 9). El SmartDrive reconoce el impulso natural del usuario y, si está encendido, activa el motor. Este continúa funcionando hasta que el usuario realiza un “golpeteo” característico con el brazo en el que lleva la pulsera. Si, en cambio, se impulsa nuevamente, el motor aumentará su velocidad (Max Mobility, 2018).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.





*Figura 9. SmartDrive, pulsera PushTracker y aplicación móvil (Permobil, 2018).*

El peso total es de 6 kg y se instala acoplándolo al eje trasero de cualquier silla, incluso las plegables (Figura 10). Utiliza un motor Brushless DC de 250 W y una batería Ion-Litio que puede llegar a dar una autonomía de 19,8 km (idealmente) (Max Mobility, 2018).



*Figura 10. SmartDrive instalado en una SRM (Max Mobility, 2018).*

### Power Pack Plus de Teyder

SAP (Figura 11) adaptable al 99% de las SRM en el mercado actual (Teyder, 2019). Permite el desplazamiento hacia adelante y hacia atrás con graduación de la velocidad. No obstruye el impulso convencional con el aro, ni el plegado de la SRM. Es compacto, pesa 13,2 Kg, y es uno de los más potentes en el mercado (300W).

Su instalación es rápida pues sólo se deben ubicar dos partes en la SRM (Figura 12). Su elemento principal está conformado por la batería, las ruedas y el motor, y se ubica en la parte trasera de la SRM usando un eje expandible que encaja en adaptadores fijados a los ejes traseros laterales. El control de mando es para el acompañante y se ubica en uno de los mangos de empuje traseros (generalmente el derecho).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 11. Power Pack Plus (Teyder, 2019).



Figura 12. Instalación del Power Pack Plus (Teyder, 2019).

### Solo Power Pack y Duo Power Pack de TGA Mobility

Su estructura y funcionamiento es similar a la del SAP anterior. El Solo Power Pack (Figura 13) tiene una sola rueda, mientras el Duo Power Pack (Figura 14) tiene dos, y por tanto es más ligero, pero podría ser más inestable. El control de mando también es para el acompañante, se enciende con llave y se controla con un freno y una perilla (TGA Mobility, 2019).



Figura 13. Solo Power Pack (TGA Mobility, 2019).



Figura 14. Duo Power Pack (TGA Mobility, 2019).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



## 1.4.2 Marco teórico

### Sillas de ruedas

#### ¿Qué es una silla de ruedas? ¿Quiénes la usan?

Las sillas de ruedas son ayudas técnicas, o tecnologías de asistencia, que buscan mantener o mejorar el funcionamiento, autonomía y comodidad de una persona en situación de discapacidad temporal o permanente. Estas son clasificadas por la OMS como ayudas técnicas prioritarias, esenciales para el funcionamiento de un individuo, por lo que deberían ser accesibles y asequibles para todo nivel social, económico y de capacidad (OMS, 2016).

Quiénes usan tienen limitaciones físicas que les impiden caminar o moverse por sí mismos. Una silla de ruedas podría definirse, entonces, como una tecnología que le permite a una persona moverse por medio de un soporte para sedestación y unas ruedas para desplazamiento (WHO, ISPO, & USAID, 2008).

#### Tipos

Para intentar satisfacer estas necesidades, se han desarrollado cientos de modelos de sillas de ruedas, pues no existe un estándar que se ajuste completamente a cada individuo. Así, las sillas de ruedas no se limitan a la clasificación tradicional: manuales y eléctricas.

Estas tecnologías de asistencia pueden clasificarse, por ejemplo, según su intención de uso: deportivas, para interiores, para exteriores urbanos o rurales, etc. Las SRM para interiores son más compactas, con bases de sustentación más pequeñas que les permite navegar por espacios limitados. Las de uso exterior rural, en cambio, son las que más estabilidad requieren, sacrificando el tamaño por una mayor base de sustentación (Figura 15). Para usuarios activos en diferentes entornos, existen sillas de ruedas para interiores y exteriores que combinan estas características (Figura 16).

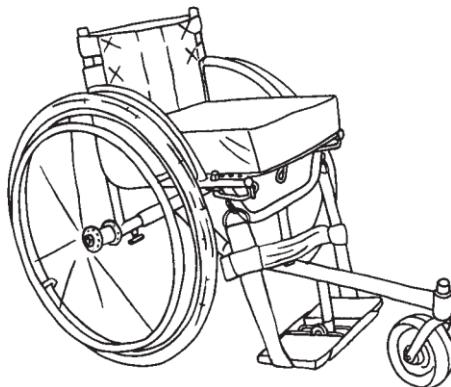


Figura 15. Silla para exteriores rurales (WHO et al., 2008).

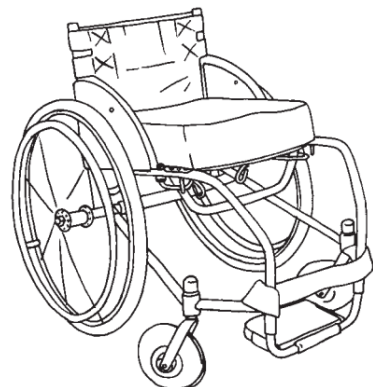
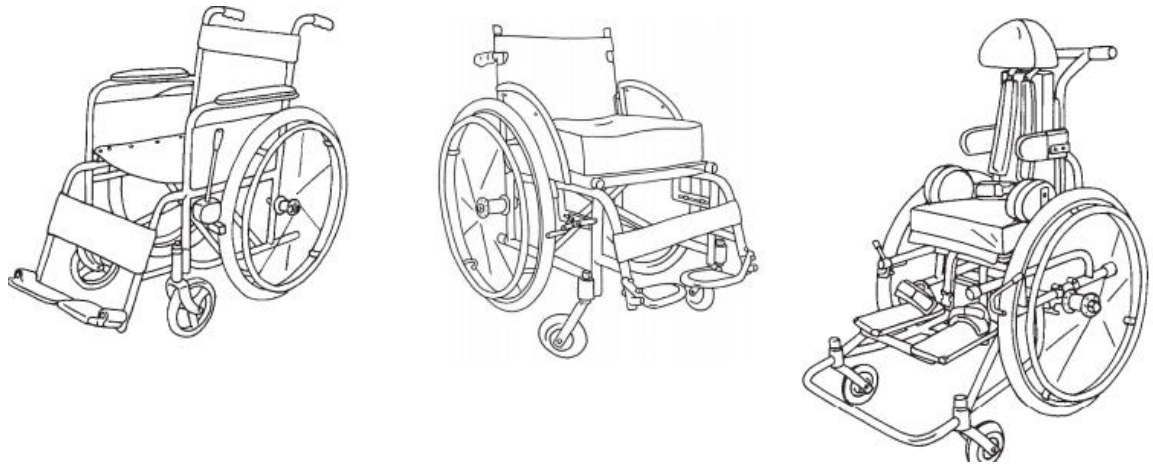


Figura 16. Silla para interiores y exteriores (WHO et al., 2008).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Asimismo, tomándose como un sistema de sedestación, las diferencias en su diseño se pueden basar en las necesidades posturales del usuario y en el tiempo que este permanecerá sentado. En la Figura 17, de izquierda a derecha, se observan tres SRM bajo esta clasificación (WHO et al., 2008).

- Hospitalaria: su uso es temporal y se limita a algunas horas en hospitales o centros de salud para transportar pacientes con un soporte básico.
- Para usuario permanente: diseñada para un uso diario en actividades cotidianas. Ofrece soporte postural y alivio de presión en puntos críticos, y puede modificarse para las medidas y necesidades de un usuario con control postural.
- Para usuario permanente de mayor limitación: usada por usuarios con menor control del tronco que requieren mayor soporte postural. Un mayor número de correas, cojines, etc. mantienen erguido al usuario sin limitar sus movimientos.



*Figura 17. Tipos de sillas de ruedas según requerimientos posturales (WHO et al., 2008).*

Una de las clasificaciones más importantes es según el método de propulsión, este define en gran parte la utilidad de esta ayuda técnica para el usuario. Primero, las SRE se componen de baterías, motores y mandos o controles (Chair Institute, 2018). Suelen ser usadas por personas con mayor limitación física, pues pueden ser controladas fácilmente con joysticks, botones u otros (Ding & Cooper, 2005).

Dentro de este grupo de las SRE, hay también muchas variaciones de tamaño, peso, soporte postural, resistencia a condiciones externas, etc. En la Figura 18a, se observa un modelo clásico. Es un diseño pesado y no apto para condiciones exteriores, pero ofrece gran comodidad para usuarios que permanezcan en la silla durante periodos prologados. En la Figura 18b, se muestra una SRE plegable, más pequeña y liviana, pero con menos soporte postural. Lo que es común a ambas SRE, es que las ruedas traseras son pequeñas y no tienen aro, pues el usuario controla la silla con un mando (un joystick en estos dos casos).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

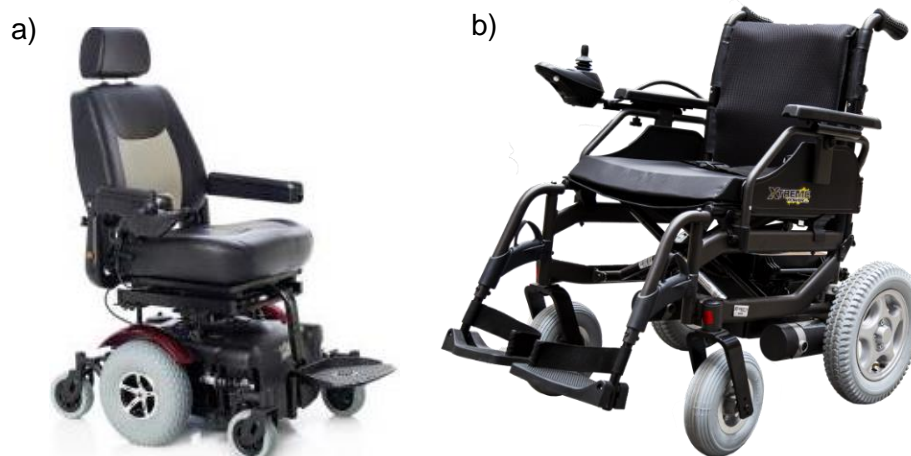


Figura 18. SRE a) para interiores (Ortopedia Viva, 2017) y b) plegable (ReActiv, 2019).

Las SRM son más compactas y livianas que las anteriores por no contar con sistemas de propulsión. Su desplazamiento depende del usuario que se impulsa con el aro en cada rueda, o de un acompañante que empuja la silla con las agarraderas o empuñaduras traseras (WHO et al., 2008). En la Figura 19, se pueden observar las partes principales de una SRM:

- |                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| A. Asiento              | G. Ruedas delanteras giratorias |
| B. Respaldo             | H. Ruedas traseras propulsoras  |
| C. Reposapiés           | I. Aros propulsores             |
| D. Reposabrazos         | J. Barras de cruceta            |
| E. Reposapiernas        | K. Barras de inclinación        |
| F. Empuñadura de empuje | L. Frenos                       |

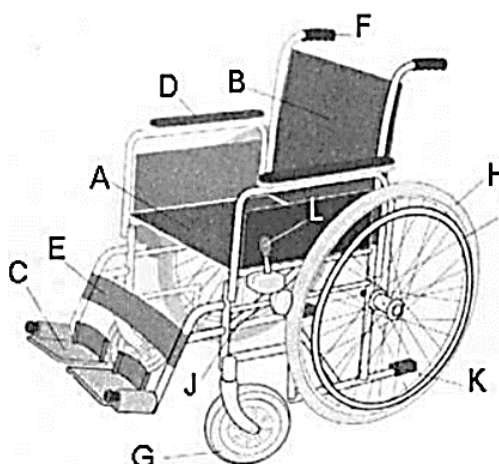


Figura 19. Partes de una SRM (Hospital de Torrevieja, 2018).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Según su estructura, se fabrican principalmente dos modelos: las rígidas, cuya estructura sólo se modifica para acoplarse a ciertas medidas antropométricas del usuario; y las plegables, que además de las anteriores modificaciones, también pueden ser plegadas para su transporte. Según el tipo de usuario y de actividad, se puede encontrar una gran variedad, como se plantea en las figuras 15, 16, y 17.

### ¿Cuál es la silla de ruedas más adecuada?

El uso de una silla de ruedas puede traer beneficios para personas de diferente edad, sexo, y condición neuromusculoesquelética, pero sólo si esta es la adecuada para sus necesidades particulares. Por esto, no hay una silla “perfecta” para todos, sino que para escoger la más adecuada, se deben tener en cuenta factores de la persona y de su ambiente como (Ragnarsson, 1990; WHO et al., 2008; Hospital de Torrevieja, 2018):

- Capacidades y habilidades del usuario
- Dimensiones y peso del usuario
- Soporte postural requerido
- Entorno en el que habita (clima, relieve, suelos, etc.)
- Actividades por realizar en la silla de ruedas
- Disponibilidad del producto
- Disponibilidad de servicios de reparación y mantenimiento
- Poder adquisitivo del usuario

### **Motores**

Los motores son máquinas que transforman un tipo de energía, como la eléctrica, química o potencial, en energía mecánica usada para generar movimientos de rotación o translación (American Heritage Dictionary, 2005).

En los motores de combustión interna, por ejemplo, una mezcla carburante (energía química) se hace reaccionar para producir trabajo mecánico. En los motores a gasolina, queroseno o gas, esta reacción comienza por una chispa eléctrica, mientras que en los motores Diesel se origina por autocombustión (Morales & Guzmán, 2014).

Por su parte, un motor eléctrico convierte energía eléctrica en mecánica, sin combustiones o explosiones, sino por medio de la interacción entre un campo magnético y una corriente, que produce una fuerza determinada. Se caracterizan por su limpieza, economía, bajo número de piezas y seguridad de funcionamiento. Aunque usan baterías para almacenar la energía eléctrica, que pueden ser de gran tamaño y peso, y necesitan recargarse entre usos, estos motores se emplean en diversas aplicaciones de la industria y el hogar, por su amplia variedad de potencias y velocidades (Enriquez, 2004).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los motores eléctricos se pueden clasificar por el tipo de fuente de poder (AC/DC), sus aplicaciones, la salida que generan u otras características (Hughes & Drury, 2013; The University of Alabama in Huntsville, 2005).

Los motores DC son los más sencillos de los motores eléctricos, y funcionan con corriente directa (DC, en inglés). Se componen de dos elementos principales: el rotor, un electroimán móvil que gira; y el estator, un imán permanente alrededor del rotor que provee un campo magnético. La conversión de energía se da por la interacción entre esta corriente y campo magnético, que genera movimiento por la atracción y repulsión entre el estator y el rotor (Hamayer, 2001) .

En los motores DC con escobillas o convencionales, estas estructuras hacen contacto con el rotor para conducir la corriente, y tienden a desgastarse por la fricción, por lo que deben ser remplazadas al cabo de un tiempo. (Electromovilidad, 2018; Karube, 1978). Los motores brushless o sin escobillas se diferencian de los anteriores porque no tienen estos elementos. De esta forma, se pierde menos energía por fricción y su mantenimiento es más sencillo.

Los servomotores son, en esencia, motores DC controlados. Estos cuentan con la estructura regular de un DC, más un sensor (encoder, resolver, etc.) y un servoamplificador (Hamayer, 2001).

Otro tipo de motor DC, son los motores paso a paso. Estos no tienen escobillas, su estator contiene las bobinas, y rotor es un imán permanente. La gran diferencia de estos es que su señal de activación es una secuencia de unos y ceros, que activa ciertas bobinas del estator. Esta activación secuencial hace que el rotor gire con un movimiento discreto, en pasos cuyo ángulo depende de la configuración del motor (Hamayer, 2001).

## **Sistemas de control**

### Conceptos básicos

El control automático forma parte esencial de una gran diversidad de dispositivos, procesos, sistemas robóticos y operaciones industriales, pues en cada uno de estos se requiere controlar variables como la humedad o la temperatura.

Existen tres teorías de control (Ogata, 2010):

- Teoría de control clásica (o convencional): compuesta principalmente por los métodos de respuesta en frecuencia y del lugar de las raíces. Aplicada a sistemas con una entrada y una salida.
- Teoría de control moderno: aplicada en mecanismos de control a plantas y sistemas cada vez más complejos, con muchas entradas y salidas. Se basa en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Teoría de control robusto: es la teoría más compleja, incluye herramientas de la respuesta en frecuencia y del dominio temporal. Busca diseñar controladores con comportamiento óptimo y estable cuando sean aplicados al sistema real.

Algunos de los conceptos más importantes para entender los sistemas de control son (Duarte, 2002; Ogata, 2010):

- Controlar: medir una variable y usar herramientas para corregir o limitar las variaciones en el valor de esta.
- Variable controlada: cantidad o condición de interés, la variable que se controlará.
- Variable manipulada (o señal de control): cantidad o condición que es modificada por el controlador para cambiar el valor de la variable anterior.
- Planta: conjunto de elementos que funcionan juntos para realizar una operación específica. El objeto físico que se controlará (como un refrigerador o un reactor).
- Procesos: operación o desarrollo continuo o progresivo donde se realizan acciones que llevan a cambios para llegar a un objetivo. La operación que se controlará.
- Sistemas: combinación de componentes que actúan juntos para lograr un objetivo. No tiene que ser físico, puede tratarse de conceptos abstractos. El sistema modifica unas entradas para convertirlas en salidas, como en la Figura 20.
- Señales: medio por el que el sistema se relaciona con su entorno. En la Figura 20, hay 3 señales de entrada al sistema y 3 de salida, representadas con las flechas que entran o salen del sistema.

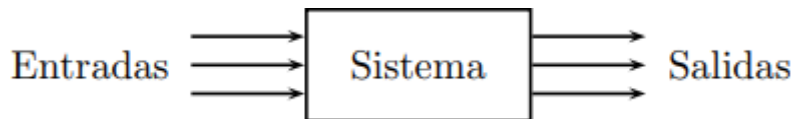


Figura 20. Esquema simple de un sistema (Duarte, 2002).

### Sistemas de segundo orden

En la Figura 21, se observa un sistema de segundo orden, representado por la ecuación en el rectángulo. Resolviendo el sistema en lazo cerrado se llega a la Ecuación 1, que es la forma estándar para la función de transferencia de un sistema de segundo, en términos de la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_n$  y el factor de amortiguamiento  $\xi$  (Ogata, 2010).

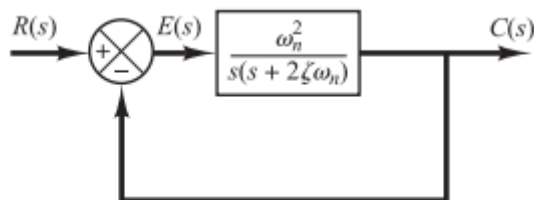


Figura 21. Diagrama de bloques de un sistema de segundo orden (Ogata, 2010).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \omega_n \xi s + \omega_n^2}$$

Ecuación 1

### Controladores

Los controladores automáticos comparan la salida de una planta con una señal de referencia (valor deseado), determinan la desviación entre ambas y generan una señal de control que la reduce a cero o a un valor cercano a este (Ogata, 2010). En la Figura 22, el controlador  $K$  es un sistema que analiza la salida  $Y(s)$  de una planta  $G_p(s)$ , medida por un sensor  $H(s)$ , y la compara con una señal de referencia  $U(s)$ , obteniendo cierto error  $E(s)$  y generando una acción de control  $U_p(s)$ .

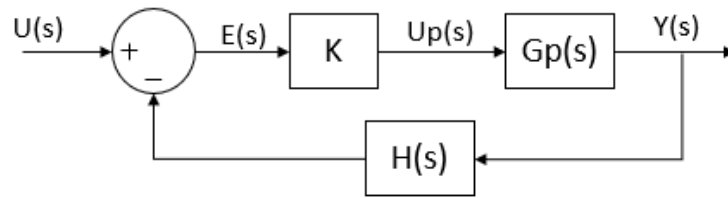


Figura 22. Diagrama de bloques de la planta  $G_p(s)$  controlada y retroalimentada.

Una de las familias de controladores más usadas son los PID y sus derivados, proporcional (P), integrador (I) y derivativo (D), y las combinaciones entre estos (PI, PD, PID). Un controlador P se describe por la Ecuación 2, siendo  $K_p$  la ganancia proporcional. Un controlador I se describe por la Ecuación 3, con la constante  $K_i$ . La Ecuación 4 es la función de transferencia de un controlador PI; la Ecuación 5, de un controlador PD; y la Ecuación 6, de un PID.

$$\frac{U_p(s)}{E(s)} = K_p$$

Ecuación 2

$$\frac{U_p(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Ecuación 3

$$\frac{U_p(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Ecuación 4

$$\frac{U_p(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

Ecuación 5

$$\frac{U_p(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Ecuación 6

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Los controladores P actúan como un amplificador de ganancia graduable. Los I son usados para eliminar, o reducir significativamente, el error en estado estable o estacionario, que como se explicará más adelante, es el error  $E(s)$  cuando el sistema se estabiliza (cuando el tiempo tiende a infinito). En un controlador PI, se combina el efecto de los dos anteriores, lo que permite modificar la ganancia y tener un error en estado estacionario cercano a cero sin que la señal de control tenga que ser cero (Ogata, 2010).

Por su parte, la acción derivativa les da a los controladores PD una alta sensibilidad y una acertada repuesta a la velocidad de cambio del error, lo que ayuda a corregirlo. Como el control derivativo opera sobre esta velocidad de cambio del error, y no sobre el error mismo, no se usa sólo, sino acompañado de una acción proporcional o una proporcional integral.

### Criterios en el diseño de controladores

En la respuesta del sistema a un escalón unitario (Figura 23), se observan algunos parámetros que ayudan a describir el comportamiento de este, y por tanto a definir los criterios para el diseño de un controlador. A continuación, se describen los principales para este trabajo.

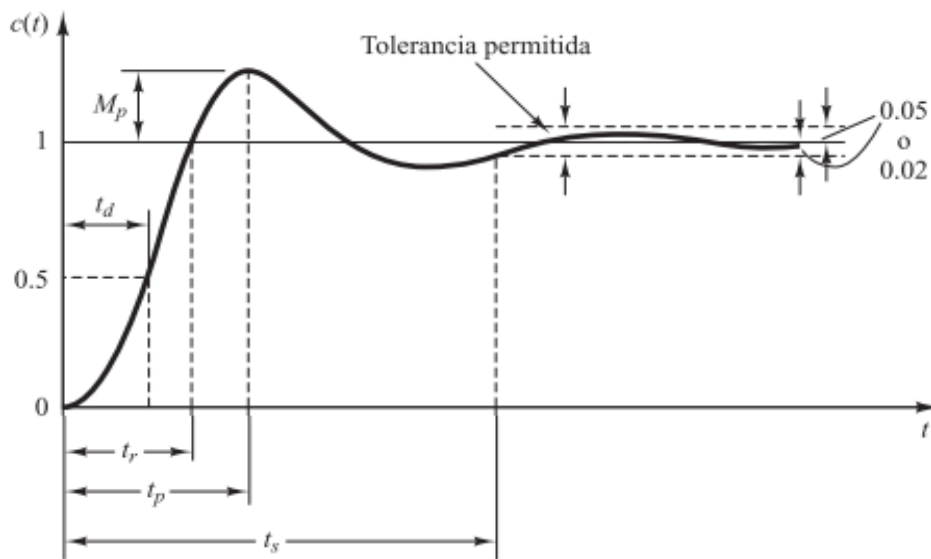


Figura 23. Respuesta del sistema a un escalón unitario (Ogata, 2010).

El máximo sobreimpulso o sobreelongación  $M_p$  es la diferencia entre el valor máximo ( $y_{max}$ ) alcanzado por la respuesta del sistema y su valor en estado estacionario ( $y_e$ ). Para definirlo como un criterio de diseño, se expresa como un porcentaje del valor final o estacionario como se observa en la Ecuación 7 (Duarte, 2002).

$$M_p = \frac{y_{max} - y_e}{y_e} \times 100\% \quad \text{Ecuación 7}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



La Ecuación 8 muestra el máximo sobreimpulso en términos de  $\omega_n$  y  $\xi$  (Duarte, 2002; Ogata, 2010).

$$M_p = e^{-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad \text{Ecuación 8}$$

El tiempo de estabilización o asentamiento  $t_s$  es el tiempo requerido para que el sistema alcance su valor final o estacionario, es decir, que la curva no supere el máximo sobreimpulso establecido. El  $t_s$  para el sistema retroalimentado se define como un porcentaje (N) del tiempo de estabilización en lazo abierto ( $t_{sla}$ ) (Ecuación 9).

$$t_s = N (t_{sla}) \quad \text{Ecuación 9}$$

El  $t_s$  se puede relacionar con la frecuencia  $\omega_n$  y el coeficiente  $\xi$  como se muestra en la Ecuación 10 (Landau & Zito, 2006).

$$\omega_n = \frac{4,6}{t_s \xi} \quad \text{Ecuación 10}$$

Como uno de los objetivos de los esquemas de control es obtener una señal de error nula, es importante definir el error de estado estacionario ( $e_{ee}$ ), como el error cuando la respuesta transitoria es ya insignificante, y sólo se considera la respuesta estacionaria del sistema.

En la Figura 22, se observa el diagrama de bloques para un sistema retroalimentado, con entrada  $U(s)$ , salida  $Y(s)$ , y error  $E(s)$ . La función de transferencia del error es la relación entre el error y la entrada (Ecuación 11).

$$F_E(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + K Gp(s) H(s)} \quad \text{Ecuación 11}$$

La función de transferencia,  $Gp(s)$ , tiene un orden definido por la mayor potencia de su denominador, y un tipo definido por el número de ceros en  $s=0$  de  $F_E(s)$ . Conociendo el tipo de sistema y su entrada, se puede determinar el error en estado estable de  $Gp(s)$  siguiendo la Tabla 1.

Tabla 1. Error en estado estacionario según el tipo de sistema y su entrada (Duarte, 2002).

Tipo de sistema	$u(t) = \mu(t)$ $U(s) = 1/s$	$u(t) = t\mu(t)$ $U(s) = 1/s^2$	$u(t) = t^2\mu(t)/2$ $U(s) = 1/s^3$	...
0	$\lim_{s \rightarrow 0} \{F_E(s)\}$	$\infty$	$\infty$	...
1	0	$\lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \frac{F_E(s)}{s} \right\}$	$\infty$	...
2	0	0	$\lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \frac{F_E(s)}{s^2} \right\}$	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 DISEÑAR EL SISTEMA MECÁNICO QUE PERMITA LA PROPULSIÓN DE SRM MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO DE ULRICH Y EPPINGER.

#### 2.1.1 Encuestas

Se utilizó una encuesta como herramienta para la recolección de datos relacionados con las expectativas de usuarios de SRM y personas con conocimientos sobre estas o ingeniería de rehabilitación acerca del comportamiento de una SRE y un SAP para SRM.

La encuesta fue realizada en la plataforma Google Forms o Formularios de Google, y constó de 11 preguntas de selección múltiple divididas en tres secciones: *Personal*, *Sillas de ruedas eléctricas*, *Sistema de asistencia a la propulsión*. En todas las preguntas se añade "Otra..." como última opción en caso de que el encuestado tuviese comentarios adicionales o respuestas alternativas.

En la sección de *Sillas de ruedas eléctricas*, se indagó sobre tres variables de funcionamiento, que las SRM motorizadas comparten: velocidad, peso soportado e inclinación. Para la sección *Sistema de asistencia a la propulsión*, se indagó sobre el peso propio del sistema, rango de precios, duración de batería, independencia de la batería, tipo de interfaz, tiempo de instalación y disponibilidad de partes en Colombia.

En total, se encuestaron 6 personas adultas, cuyos datos personales nunca fueron preguntados y quienes respondieron en línea de forma anónima e independiente. La encuesta se encuentra en el Anexo 1.

#### 2.1.2 Contextualización en el mercado

Se realizó una breve revisión de las especificaciones de sistemas ya existentes relacionados con el SAP objetivo. Para las SRM y SRE se hizo una búsqueda únicamente en Colombia, que tuvieran un centro de distribución en el país (no importadas por particulares). En el caso los sistemas de propulsión, al no encontrar una base fuerte en Colombia, se analizaron algunos productos disponibles a nivel mundial, especialmente en EEUU.

Primero, se definieron cuatro características de interés para la SRM, según el alcance del presente trabajo: el peso máximo que la silla soporta o resiste, el peso propio de la silla, su precio comercial por unidad, y su resistencia a condiciones del ambiente. Se evaluaron estas características en SRM de varios tipos, para favorecer la diversidad de información.

Para las SRE, la información recolectada se dividió en dos categorías: características básicas (velocidad máxima, inclinación máxima, máximo peso soportado, peso de la silla, precio por unidad, resistencia a condiciones externas) y electromecánicas (tipo de motor,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

tipo de batería, duración de la batería, distancia recorrida por carga, tipo de interfaz). Estas mismas categorías, y sus respectivas características, fueron estudiadas en los SAP.

### **2.1.3 Identificar las necesidades del usuario**

Este corresponde al primer paso de la metodología Ulrich y Eppinger, posterior a la recolección de información previa. Se identificaron las necesidades del usuario a partir de las entrevistas y revisiones realizadas, y se organizaron en un listado dividido según la parte del SAP al que hacen referencia.

### **2.1.4 Establecer especificaciones objetivo**

A partir de las necesidades, se determinó una lista de especificaciones o requerimientos que debe cumplir el producto. Es decir, se tradujeron las necesidades del usuario en términos técnicos y medibles que determinen el diseño del producto. Como cada una de estas actúa como un objetivo específico, se les asoció una métrica y un valor marginal. El valor dado a estas variables se basó en las búsquedas y cálculos anteriores.

### **2.1.5 Análisis de funciones**

Primero, se diseñó la caja negra, un diagrama donde se definen las entradas y salidas del SAP, sin describir la transformación de estas. Se exponen tres tipos de variables: materia, que hacen referencia a elementos o partes físicas; energía, que es la fuente de alimentación o movimiento; y señal, que se refiere a cualquier información enviada de un ente a otro, como una variación de voltaje o una frecuencia característica.

Luego, se establecieron las funciones y subfunciones específicas que un SAP debe cumplir para garantizar la transformación de las entradas en las salidas. Estas funciones fueron después organizadas en la caja transparente, donde se observa su relación entre sí y con las entradas y salidas.

### **2.1.6 Alternativas de solución**

Para cada una de las funciones anteriores, se generaron diferentes alternativas de solución, ideas que podrían satisfacer las necesidades y requerimientos expuestos. Estos fueron presentados con un título, un diagrama o imagen y una descripción.

Se construye una matriz morfológica con el nombre y el diagrama de las opciones solución de cada función. El objetivo de esta matriz es formar diferentes conceptos solución para todo el sistema, conectando ciertas opciones de cada función entre sí.

### **2.1.7 Selección de concepto**

Teniendo en cuenta los requerimientos, se determinaron seis criterios de selección, enunciados con las características más importantes que debería tener el producto final y su respectivo peso o importancia. Se definieron, también, las escalas de calificación para cada

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

uno de estos. Después, los conceptos solución formados en la matriz morfológica fueron calificados de acuerdo con estas escalas, y se escogió la alternativa con mayor puntuación.

### **2.1.8 Diseño en detalle**

A partir del concepto solución seleccionado, se calculó el torque que se debe generar en las ruedas para que el movimiento sea posible, se diseñó un sistema de transmisión de potencia y se buscó un motor que se ajuste a los requerimientos encontrados. Se utilizó la herramienta Solid Edge para modelar la estructura del SAP, definiendo partes, dimensiones y materiales hasta llegar a un modelo óptimo. Por último, se descargó un modelo 3D libre de SRM estándar del portal GrabCAD para demostrar el acople con el SAP (GrabCAD Community, 2019).

## **2.2 DISEÑAR EL SISTEMA DE CONTROL PARA EL SOPORTE EN LA PROPULSIÓN DE SRM.**

### **2.2.1 Identificación de la planta**

El objetivo de esta sección fue describir el sistema a controlar, es decir, determinar la función de transferencia de la planta. Para esto se definió un protocolo de identificación, y se realizó una prueba de concepto de este con un motor DC 100:1 Metal Gearmotor marca Pololu (Pololu, 2019). Se utiliza este motor, y no el descrito en la sección anterior, por su disponibilidad en la universidad.

Se construyó un programa en Labview a partir de una plantilla disponible en la universidad. Se usó para someter el motor a cambios paulatinos de PWM mientras se guardan datos de ciclo de trabajo, velocidad, y tiempo, con el objetivo de conocer la respuesta del motor a un escalón y así poder caracterizar el sistema.

Como se muestra en la Figura 24, el programa tiene dos partes: Main IU y MainIndent RT. Estas representan, respectivamente, el computador y el myRIO, dispositivo embebido de National Instruments® usado para adquirir señales (National Instruments, 2019).

El programa ofrece una forma de comunicación entre computador y myRIO que no afecta tiempos de muestreo u otras variables importantes en la identificación del sistema. La sección de “UI Message loop” transmite los mensajes de la interfaz de usuario, como botones de parada y controles, que son leídos por la myRIO en la sección “Message loop”. En “Data sending loop”, el myRIO envía los datos recolectados (velocidad, ciclo de trabajo y tiempo) a la sección de “Data reading loop” en el Main IU, que los guarda un archivo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

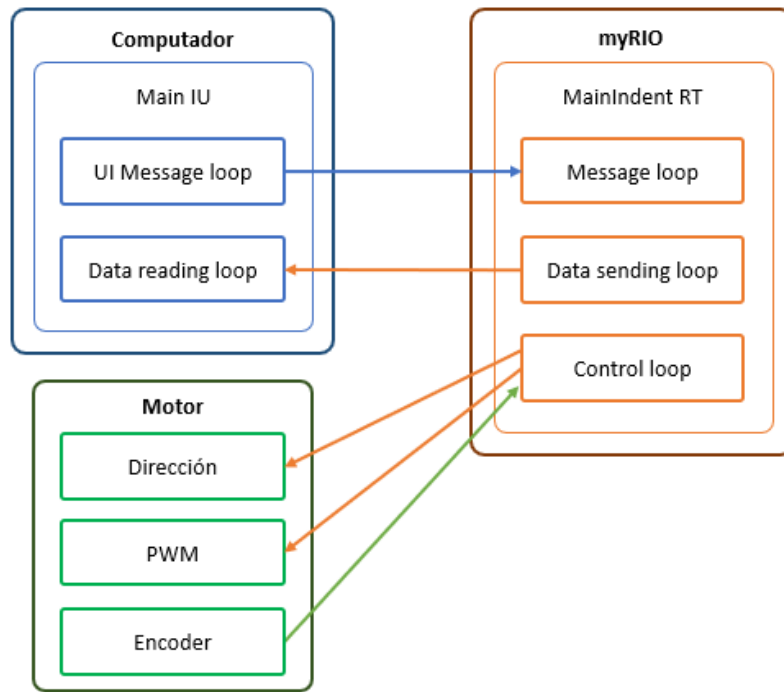


Figura 24. Diagrama del programa de Labview.

La sección de “Control loop” de MainIdent RT se puede considerar como la principal, pues es la sección modificada para enviar y recibir información del motor, es aquí donde se adquirieron los datos necesarios para la identificación de la planta.

Después de una breve preparación en Excel, se importaron los datos obtenidos a la herramienta de System Identification de MATLAB, que consistieron en una variable de entrada (ciclo de trabajo) y una de salida (velocidad), indicando el tiempo de muestreo trabajado en Labview.

Para crear el modelo, se diseñaron varias funciones de transferencia con diferentes configuraciones de polos y ceros. Luego se escogió uno de estos, teniendo en cuenta la alineación a la estimación (qué tan acertado es el modelo según los datos esperados) y su simplicidad (según el número de polos y ceros) deseada para este trabajo.

### 2.2.2 Selección del controlador

Se elige un tipo de controlador entre los proporcionales, integradores, derivadores y las combinaciones entre estos, según las definiciones y características descritas anteriormente. Se tienen en cuenta la forma como funcionará el sistema, sus limitaciones físicas y características. Luego, se obtiene su función de transferencia  $G_C(s)$ .

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### 2.2.3 Diseño del controlador

Objetivos de diseño: Se establecieron los valores para tres criterios u objetivos de diseño:

- Máximo sobreimpulso ( $M_p$ )
- Error en estado estable ( $e_{ee}$ )
- Tiempo de estabilización ( $t_s$ )

Polinomio característico: El polinomio característico del sistema  $B_c(s)$  es el denominador de la función de transferencia del sistema en lazo  $G_{dlc}$ . Para obtener  $G_{dlc}$ , se resolvió el diagrama de bloques de la Figura 25, una versión simplificada del de la Figura 22.



Figura 25. Diagrama de bloques simplificado.

Se definieron las funciones de transferencia del controlador y la planta, se resolvió el sistema en lazo cerrado  $G_{dlc}$  (Ecuación 12). Se separó y normalizó su denominador  $B_c(s)$ . Los cálculos se realizaron usando la herramienta de álgebra computacional MuPAD de MATLAB.

$$G_{dlc} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad \text{Ecuación 12}$$

Criterio de Routh-Hurwitz: se aplicó este criterio con los coeficientes del polinomio característico para verificar la estabilidad de un sistema.

Polinomio deseado: el polinomio deseado es el denominador de la forma estándar de la ecuación para un sistema de segundo orden (Ecuación 1). De acuerdo con los objetivos de diseño definidos, se halló el valor de  $\omega_n$  y  $\xi$ , usando MuPAD.

Parámetros del controlador: se hallan  $K_p$  y  $\tau_i$  igualando los coeficientes de  $B_c(s)$  y  $B_d(s)$ , usando la herramienta MuPAD.

Discretización: se discretiza  $G_c(s)$  para obtener  $G_c[z]$ , usando la función  $c2d$  de MATLAB.

Ecuación en diferencias: se halla la ecuación en diferencias, multiplicando  $G_c[z]$  por  $\frac{z^{-1}}{z^{-1}}$ .

## **2.3 VERIFICAR EL DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO Y DE CONTROL MEDIANTE SIMULACIONES.**

### **2.3.1 Simulación de la respuesta del controlador**

Se analizaron las respuestas a un escalón unitario de la planta original ( $G_p$ ) y del nuevo sistema controlado en lazo cerrado ( $G_{dlc}$ ), utilizando la función *step()* de MATLAB. Con estas simulaciones se verificó que el comportamiento del sistema antes y después de la acción del controlador sea lo esperado.

### **2.3.2 Evaluación del desempeño y de la estabilidad del controlador**

Para analizar el comportamiento del sistema planta-controlador, se compararon los resultados al estimular el sistema final con un escalón en Matlab, con respecto a los criterios de diseño definidos. Se calculó el error obtenido, como medida de evaluación de su desempeño.

Finalmente, se verificó el comportamiento del controlador en un entorno real haciendo un montaje en Labview, con un myRIO, un motor DC 100:1 Metal Gearmotor (el usado para la identificación) y un puente H (L298N). El objetivo de este ensayo fue controlar la velocidad del motor usando el controlador diseñado, por medio de la ecuación en diferencias que resulta del diseño del controlador anterior.

Para el programa en Labview se utilizó la plantilla mencionada anteriormente, con modificaciones en el "Control loop" según el nuevo objetivo. Se observó el comportamiento del motor y del error al cambiar la variable "setpoint", que ahora representa la velocidad del motor ingresada por el usuario.

### **2.3.3 Simulación por elementos finitos de los sistemas mecánicos**

Utilizando Solid Edge, se hace un análisis de esfuerzos y de desplazamientos para determinar si el modelo mecánico diseñado soporta y es estable ante las fuerzas a las que estaría sometido durante su funcionamiento, según los requerimientos definidos.

### **2.3.4 Comprobación general del diseño**

En esta sección final se hace una recapitulación general de la solución generada. Es una evaluación del cumplimiento de los requerimientos establecidos para el diseño del SAP, y se incluye para poder presentar y discutir los resultados generales del diseño.

### 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 DISEÑAR EL SISTEMA MECÁNICO QUE PERMITA LA PROPULSIÓN DE SRM MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO DE ULRICH Y EPPINGER

##### 3.1.1 Encuestas

De los 6 encuestados, para la sección *Personal*, dos individuos son usuarios de SRM, dos escogieron la opción de “persona con conocimiento sobre rehabilitación y sillas de ruedas”, otra aclaró que ha “trabajado adaptándolas, pero no soy(es) experto”, y la última no respondió.

Para todas las figuras donde se presentan los resultados, el número sobre cada color apilado en la columna representa el porcentaje del total de personas para cada respuesta, según la convención.

Desde la Figura 26 hasta la Figura 28, se muestran los resultados de la sección SRE. En la Figura 26, se observa el resultado para la pregunta sobre el rango de velocidades. Las tres opciones de respuesta corresponden al límite superior del intervalo, es decir, la velocidad máxima, tomando la velocidad mínima como 0 km/h. Todos los encuestados coinciden en una velocidad máxima de 6 km/h.

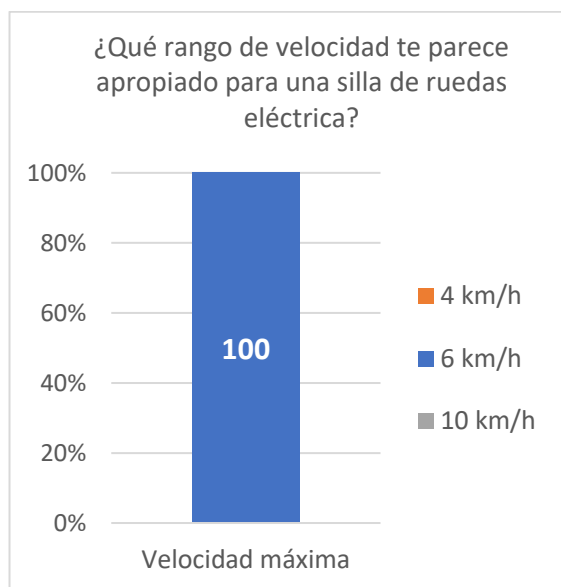


Figura 26. Velocidad máxima ideal de una SRE (encuesta).

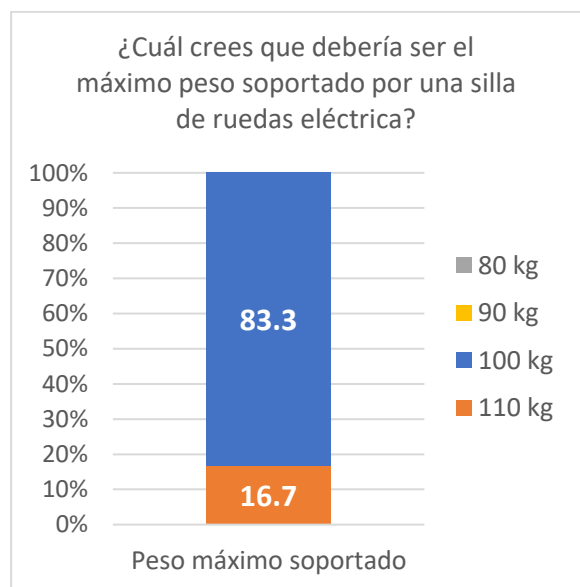


Figura 27. Peso máximo ideal soportado por una SRE (encuesta).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



La siguiente variable fue el peso que la SRE debería soportar, que equivale al peso que puede llevar (usuario y accesorios) mientras mantiene un funcionamiento normal y seguro. Los resultados se exponen en la Figura 27, donde la mayoría (83%) de las respuestas escogieron a 100 kg como el peso ideal.

La última medida estudiada en esta sección fue la inclinación soportada, o la inclinación del terreno sobre el que una SRE debería avanzar autónomamente. La Figura 28, muestra que la mayoría (50%) de los encuestados eligieron una inclinación de 10°.

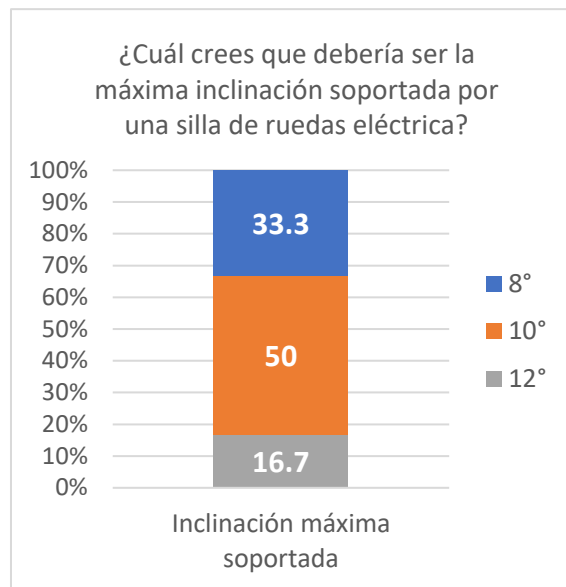


Figura 28. Inclinación máxima ideal soportada por una SER (encuesta).

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la tercera sección, *Sistemas de asistencia a la propulsión*. Primero se muestran las respuestas para la variable de peso máximo de un SAP, donde el 66.7% eligió 5 kg como peso ideal (Figura 29).

La segunda variable estudiada fue el precio adecuado para un SAP, y las opciones se presentaron en USD y en COP. En la Figura 30, se observa que el rango más votado fue el de 200 - 300 USD (680.000 - 1.000.000 COP), escogido por el 50% de los encuestados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

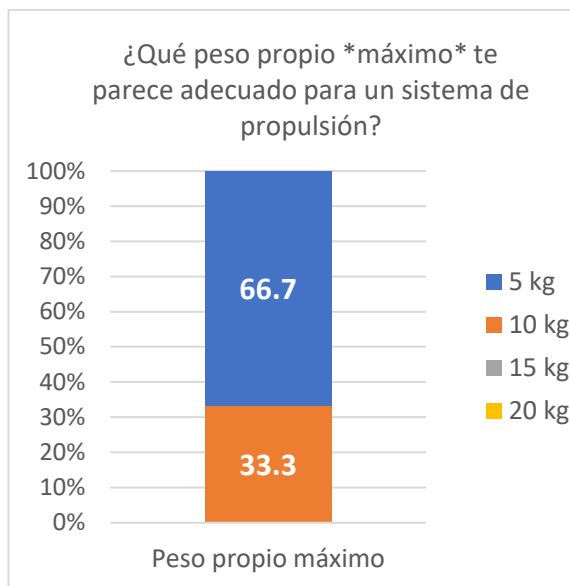


Figura 29. Peso propio máximo ideal de un SAP (encuesta).

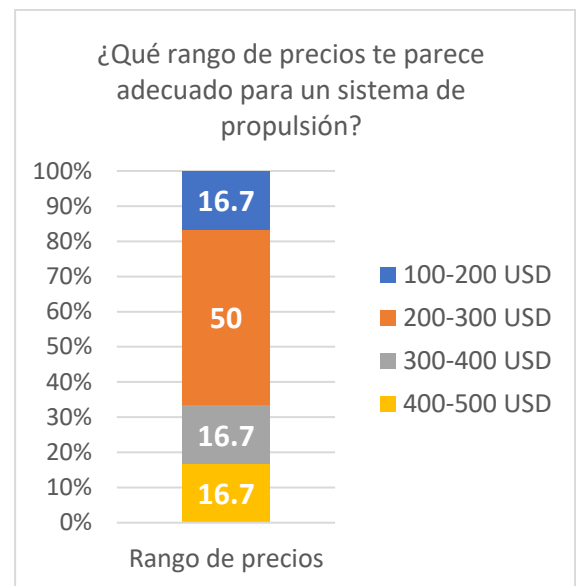


Figura 30. Rango de precios ideal de un SAP, (encuesta).

En cuanto a las baterías que alimentan un SAP, el 50% de los encuestados escogió un periodo de 6 horas como la duración ideal de la carga, y el 50% restante escogió una de 8 horas (Figura 31). Por otro lado, para la independencia en términos de distancia recorrida con una sola carga, el 50% prefirió una independencia de 15 km (Figura 32).

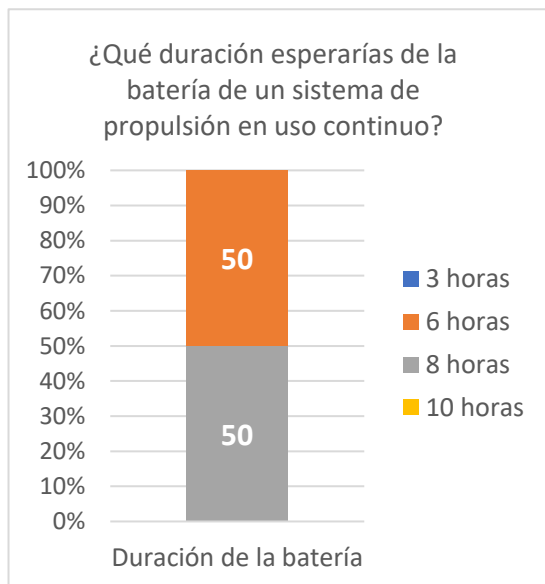


Figura 31. Duración de la batería de un SAP (encuesta).

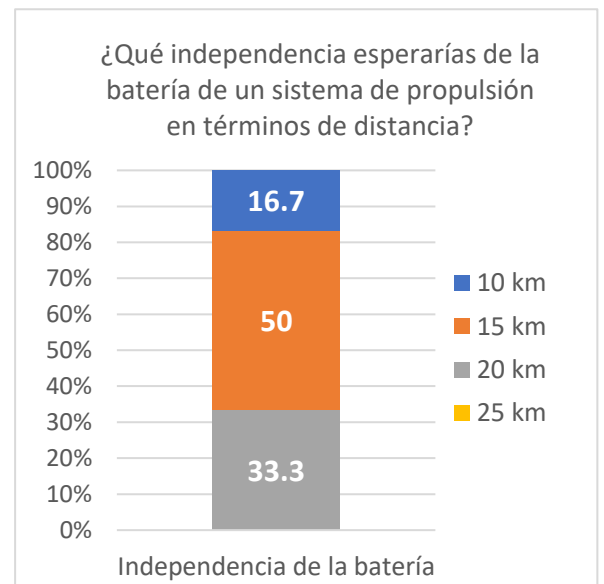


Figura 32. Independencia de la batería de un SAP (encuesta).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La interfaz es un dispositivo que permite que el usuario controle el SAP, como en una SRE. Aquí, el más votado fue el joystick (50%), y un encuestado (16.7%) usó el campo “otros” para proponer un sistema wearable (Figura 33).

La siguiente variable, el tiempo de instalación, se refiere al tiempo que se demora el usuario (u otra persona) en acoplar el SAP a una SRM estándar. La Figura 34 indica que el 50% de los encuestados preferiría que este fuera de 1 a 5 minutos.

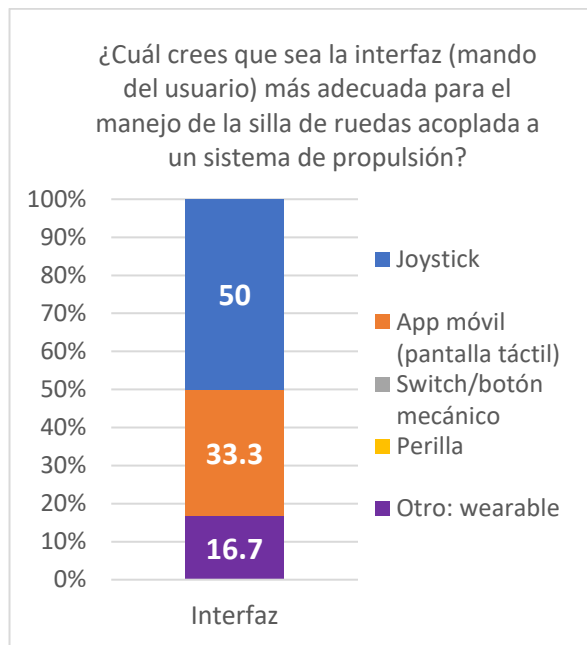


Figura 33. Interfaz de un SAP, resultado de la encuesta.

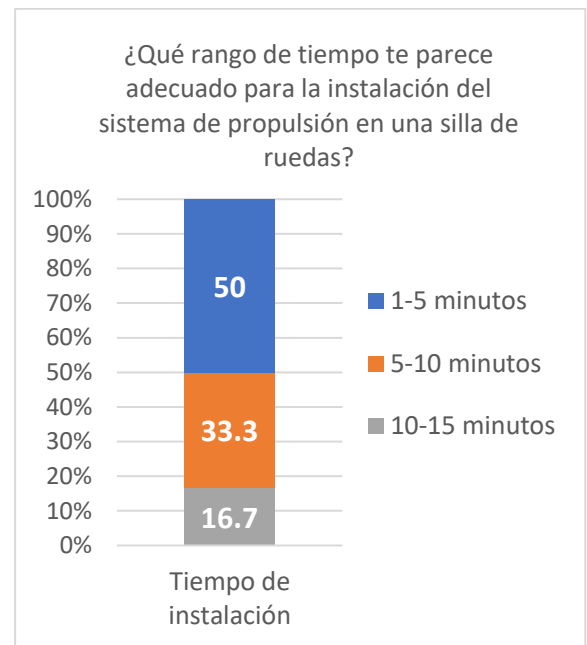


Figura 34. Tiempo de instalación de un SAP, resultado de la encuesta.

El último resultado obtenido fue que la mayoría de encuestados (83.3%) contestó que sí es importante que partes de un SAP estén disponibles en Colombia (Figura 35).

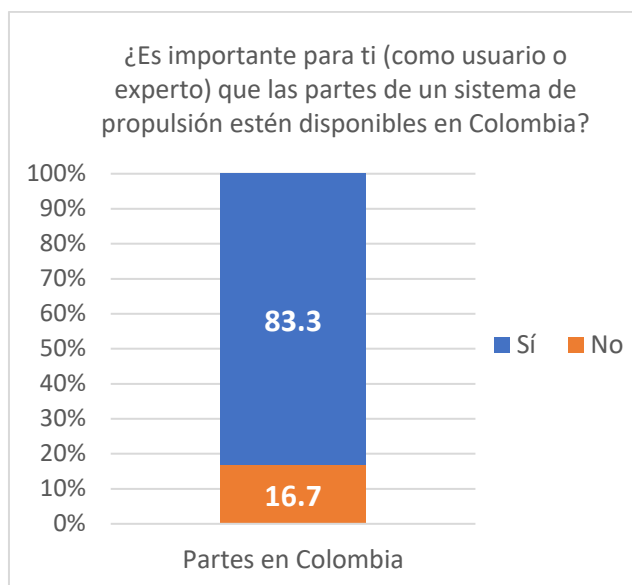


Figura 35. Disponibilidad en Colombia de las partes de un SAP, resultado de la encuesta.

### 3.1.2 Contextualización en el mercado

En la Tabla 2, se presenta la información recopilada para cada SRM encontrada, respecto a las cuatro características previamente definidas: el peso máximo que la silla soporta o resiste (Peso soportado), el peso propio de la silla (Peso silla), su precio comercial por unidad (Precio), y su resistencia a condiciones del ambiente (Res. Conds.).

Esta última característica no está descrita ampliamente por los fabricantes o distribuidores, se decidió dejar la casilla en blanco en caso de no encontrar esta información. Se incluye esta variable, aún con la falta de datos, porque la versatilidad y resistencia a condiciones exteriores de las SRM es una ventaja importante sobre las SRE.

Tabla 2. SRM en Colombia.

Descripción	Peso soportado (Kg)	Peso silla (Kg)	Precio (COP)	Res. Conds.	Ref.
SRM Estándar - Aluminio	90	14.2	\$786,000	Ext/Int	(Los Pinos, 2019c)
SRM Acero Ultraligero	130	21.24	\$1,013,000	70% ext; 30% int	(Los Pinos, 2019a)
SRM Semi deportiva (fibra de carbono)	100	9.5	\$6,030,000	-	(TME, 2017c)
SRM Estándar	90	14.2	\$795,000	-	(TME, 2017b)
SRM Estándar plegable	100	16	\$320,000	-	(TME, 2017i)
SRM Semideportiva (Al)	115	14.5	\$2,350,000	-	(TME, 2017d)
SRM Estándar de lujo	90	18	\$400,000	-	(TME, 2017a)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El peso soportado es de alrededor de 100 Kg en promedio, aumentando para sillas semi deportivas o ultraligeras, que tienden a ser más especializadas y con un precio más elevado. El promedio para el peso propio de la silla es de 15.4 Kg. Sólo 2 de las 7 SRM tenían información acerca de las condiciones que resisten, y ambas dicen ser aptas para interiores y exteriores.

El precio fue la variable más cambiante, pues depende de muchas características como el material de la estructura, la cojinería, y el objetivo de la silla (deportiva, estándar, etc.). Las sillas más caras son aquellas destinadas a actividades específicas, como las deportivas y semi deportivas, o aquellas con accesorios extra, como las neurológicas que cuentan con cojinería especial. Sin embargo, las SRM estándar más sencillas tienen un precio promedio de alrededor de \$400,000 o \$500,000 COP.

En las tablas 3 y 4, se muestra la información recopilada para las SRE según las categorías definidas previamente en la metodología, características básicas y características electromecánicas, respectivamente.

*Tabla 3. Sillas de ruedas eléctricas en Colombia. Características básicas.*

Descripción	Vel. Máx. (Km/h)	Inclinación Máx. (°)	Peso soportado (Kg)	Peso silla (Kg)	Precio (COP)	Res. Cond.	Ref.
SRE110A	6	12	90	63.2	\$4,919,000	Int.	(Los Pinos, 2019b)
SRE TME-123	11.8	12	120	75	\$7,350,000	-	(TME, 2017f)
SRE TME-125	10	12	110	82	\$8,100,000	-	(TME, 2017g)
SRE TME-012	6	8	110	-	\$6,175,000	-	(TME, 2017e)
SRE TME-003	6	8	110	-	\$4,680,000	-	(TME, 2017h)
SR motorizada estándar	6	12	90	34.5	\$6,400,000	Int.	(HomeCare Technology, 2017)
SRE MERITS	6	10	-	-	\$5,500,000	-	(Abastecedor Ortopédico, 2019)

La velocidad máxima fue de 6 Km/h en la mayoría de los casos, y tuvo un promedio de 7.4 Km/h. La inclinación máxima que las SRE estudiadas toleran estuvo entre 8° y 12°, con un promedio de 10.6°. El peso máximo soportado por estos dispositivos tuvo un promedio de 105 Kg, muy similar al caso de las SRM. No obstante, el peso propio de la silla es notablemente mayor, con un promedio de 63.7 Kg, cuatro veces mayor al de las SRM.

En cuanto al precio, también se puede ver una diferencia notable entre los dos tipos de sillas. Las SRE tienen un precio promedio de \$6,160,000 COP, más de 10 veces mayor al de una SRM estándar sencilla, y unas 3 veces mayor al precio de SRM más especializadas como las semi deportivas. Por último, sólo dos de las SRE analizadas mencionan las condiciones para las que fueron diseñadas, y como era de esperarse, son para interiores.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 4. Sillas de ruedas eléctricas en Colombia. Características electromecánicas.

Descripción	Motores	Batería	Duración bat. (h)	Distancia / carga (Km)	Interfaz	Ref.
SRE110A	200 W	28 Ah (Li)	8	-	Joystick	(Los Pinos, 2019b)
SRE TME-123	250 W, 24v (2)	40 Ah	-	-	Joystick	(TME, 2017f)
SRE TME-125	200 W, 24v (2)	40 Ah (2)	-	-	Joystick	(TME, 2017g)
SER TME-012	200 W, 24V (2)	24 V, 32 Ah	8	20	Joystick	(TME, 2017e)
SRE TME-003	200 W, 24V (2)	24 V, 32 Ah	8	20	Joystick	(TME, 2017h)
SR Motorizada estándar	200W (2)	28 A (Litio)	-	20	Joystick	(HomeCare Technology, 2017)
SRE MERITS	-	12V, 34Ah (2)	-	12	Joystick	(Abastecedor Ortopédico, 2019)

Para el caso de las características electromecánicas, Tabla 4, la mayoría de las sillas estudiadas cuenta con dos motores con una potencia de 200 W, que funcionan a un voltaje de 24 V, mientras que las baterías fueron bastante variadas. Los datos de duración (tiempo) e independencia (km/carga) no se encontraron para todas las SRE, pero los disponibles apuntan a una duración de 8 horas y una independencia de 20 km. Por último, todas las SRE tienen un joystick como interfaz o control de mando.

En las tablas 5 y 6, se presentan los resultados según las mismas características y categorías, pero esta vez para los SAP. En la primera (Tabla 5) se observa que la mayoría de estos tienen una velocidad máxima de 6km/h. La única excepción es el sistema Firefly, que está pensado no sólo para movilidad personal sino como ayuda en el transporte, lo que explica su alta velocidad.

Tabla 5. Sistemas de propulsión. Características básicas.

Descripción	Vel. Máx. (Km/h)	Inclinación Máx. (°)	Peso soportado (Kg)	Peso propio (Kg)	Precio (COP)	Res. Cond.	Ref.
E-Fix E35 - Alber	6	-	120	11.4	\$21,400,775	-	(Alber, 2019a)
E-Fix E36 - Alber	6	-	160	11.3	\$21,689,775	-	(Alber, 2019a)
Smart Drive MX2 + PushTracker™	6 (def.) ajustable	-	159	5.7	\$21,895,007	-	(Max Mobility, 2018)
Power Pack Plus - Teyder	5.5	10	159	13	\$2,636,315	-	(Teyder, 2019)
Solo power pack - TGA Mobility	6	-	114.5	-	\$2,987,426	-	(TGA Mobility, 2019)
Duo power pack - TGA Mobility	6	-	114.5	-	\$3,984,897	-	(TGA Mobility, 2019)
Firefly - Rio Mobility	19	-	-	11.2	\$8,237,961	-	(Rio Mobility, 2016)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La inclinación máxima sólo fue especificada en un caso y, aunque por esto no es un dato concluyente, sí coincide con el valor encontrado en las encuestas. La variable de peso soportado para los SAP incluye silla de ruedas, usuario y accesorios, por lo que es mayor al de las SRM y SRE, con un valor promedio de alrededor de 138 kg. El peso propio de estos sistemas tiene un promedio de 10.5 kg.

El precio varió desde aproximadamente \$3,000,000 COP hasta más de los \$20,000,000 COP, y tuvo un promedio de aproximadamente \$11,833,000 COP. La resistencia a condiciones internas o externas no fue especificada en ninguno de los SAP estudiados. Por último, el tiempo de instalación tampoco fue especificado, se optó por no añadirlo a la tabla.

La Tabla 6 expone las características electromecánicas de los SAP estudiados. Para los motores y baterías se encontraron valores muy variados, pero la mayoría de los motores fueron eléctricos DC. No se especificó la duración de la batería en ninguno de los casos, pero sí su independencia, que tuvo un promedio de aproximadamente 18 Km. En las interfaces se encontró una combinación de joystick, perillas, botones y un brazaletes.

*Tabla 6. Sistemas de propulsión. Características electromecánicas.*

Descripción	Motores	Batería	Duración bat. (h)	Distancia / carga (Km)	Interfaz	Ref.
E-Fix E35 - Alber	-	36 V, 6.0 Ah, 216 Wh	-	16	Joystick + botones	(Alber, 2019a)
E-Fix E36 - Alber	-	36 V, 7.5 Ah, 270 Wh	-	18	Joystick + botones	(Alber, 2019a)
Smart Drive MX2 + PushTracker™	250W, 36V, DC SE*	36 V, 3.4 Ah, Li-ion	-	19	Brazaletes PushTracker	(Max Mobility, 2018)
Power Pack Plus - Teyder	120-300W, 12V, DC	12 V, 20 Ah	-	16	Perilla + botones	(Teyder, 2019)
Solo power pack - TGA Mobility	160 W, 12 V	12 V, 20 Ah	-	16	Perilla para acompañante	(TGA Mobility, 2019)
Duo power pack - TGA Mobility	160 W, 12 V	12 V, 20 Ah	-	16	Perilla para acompañante	(TGA Mobility, 2019)
Firefly - Rio Mobility	350W, 36V, DC SE*	36V, 6.6 Ah, 238 Wh, Ion Li	-	24	Manubrio moto	(Rio Mobility, 2016)
*SE: Sin escobillas						

### 3.1.3 Identificar las necesidades del usuario

A continuación, se presenta la lista de necesidades del usuario del SAP, de acuerdo con las entrevistas y contextualización del mercado realizada (Tabla 7).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 7. Lista de necesidades del usuario.

No.	Necesidades
	<b>Sistema electromecánico</b>
1	Permite un rango de velocidades amplio para uso cotidiano
2	Puede impulsar la SRM por rampas con inclinaciones comunes
3	Se puede instalar en una SRM estándar
4	Es ligero
5	Su precio es competitivo en el mercado
6	Sus partes se producen a nivel nacional
7	Es de fácil activación y desactivación
8	Tiene buena autonomía a nivel de batería
9	Es de fácil mantenimiento y reparación
	<b>Acople silla + sistema electromecánico</b>
10	Es resistente a la suciedad y otras condiciones ambientales
11	Cumple con normas colombianas
12	Es apto para personas con dimensiones y características promedio colombianas
	<b>Sistema de control</b>
13	Permite controlar la SRM con exactitud y precisión, y en el tiempo adecuado
14	Su funcionamiento es seguro, libre de fallas
15	La velocidad es fácil de graduar y controlar
16	Tiene una interfaz amigable con el usuario (fácil de entender y usar)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



### 3.1.4 Establecer especificaciones objetivo

Las especificaciones del producto objetivo se muestran en la Tabla 8. En cada una se indica su número, la necesidad a la que hace referencia, una descripción, su importancia para el diseño en términos de la variable “peso”, las unidades en las que se mide, y un valor estimado o ideal. Este último valor parte de las encuestas, las revisiones y el criterio del diseñador.

Tabla 8. Especificaciones objetivo.

#	Necesidad	Especificación	Peso	Unidades	Valor Estimado
1	1, 11, 15, 16	Velocidad máxima	5	km/h	6
2	2, 11	Inclinación máxima soportada	5	°	10
3	3, 9	Tiempo de instalación (o desinstalación)	3	min	5
4	4	Masa de todo el sistema	3	Kg	<10
5	5, 6	Costo de producción del sistema	4	USD	<500
6	6, 9	Partes están disponibles en Colombia	4	sí/no	sí
7	8	Duración batería	3	horas	8
8	8	Distancia recorrida por carga de batería	3	km	15
9	10	Resistencia a condiciones exteriores	3	sí/no	sí
10	12	“Peso” soportado máximo (usuario + SRM)	5	Kg	>100
11	7, 13	Tiempo de procesamiento	5	s	<0.5
12	13	Error	5	%	<10
13	14	Seguridad	5	Subj.	>4 (/5)
14	15	Sistema sencillo para graduar la velocidad	5	sí/no	sí
15	7, 16	Interfaz amigable con el usuario	4	sí/no	sí

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### 3.1.5 Análisis de funciones

En la Figura 36, se observa la caja negra para el sistema. Las entradas se definen así:

- Materia: Usuario en su SRM en la posición inicial.
- Energía: energía eléctrica de la batería.
- Señal: señal proveniente del mando de control o interfaz de usuario.

Las salidas se definen así:

- Materia: Usuario en SRM desplazado.
- Energía: la energía se convierte en movimiento o desplazamiento.
- Señal: velocidad medida del sistema en movimiento.

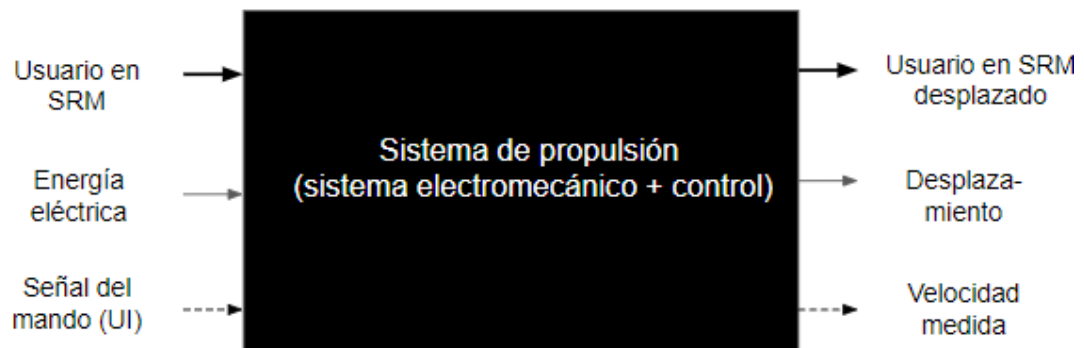


Figura 36. Caja negra para el sistema de propulsión.

Luego se planteó la siguiente lista de funciones, con el objetivo de que estas describan el funcionamiento del SAP en su totalidad, desde el primer paso en su uso, hasta el último.

1. Instalar el sistema en una SRM
  - 1.1. Acoplar el motor
  - 1.2. Acoplar la batería
  - 1.3. Acoplar el mando
2. Activar el sistema
  - 2.1. Accionar “activador”
3. Controlar la velocidad
  - 3.1. Leer señal del control de mando
  - 3.2. Leer la velocidad del motor
  - 3.3. Activar o desactivar el motor
4. Desactivar el sistema
  - 4.1. Accionar “activador”
5. Desinstalar el sistema
  - 5.1. Desacoplar el motor
  - 5.2. Desacoplar la batería
  - 5.3. Retirar el mando

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La caja transparente (Figura 37) muestra las relaciones entre las entradas, salidas, y funciones mencionadas.

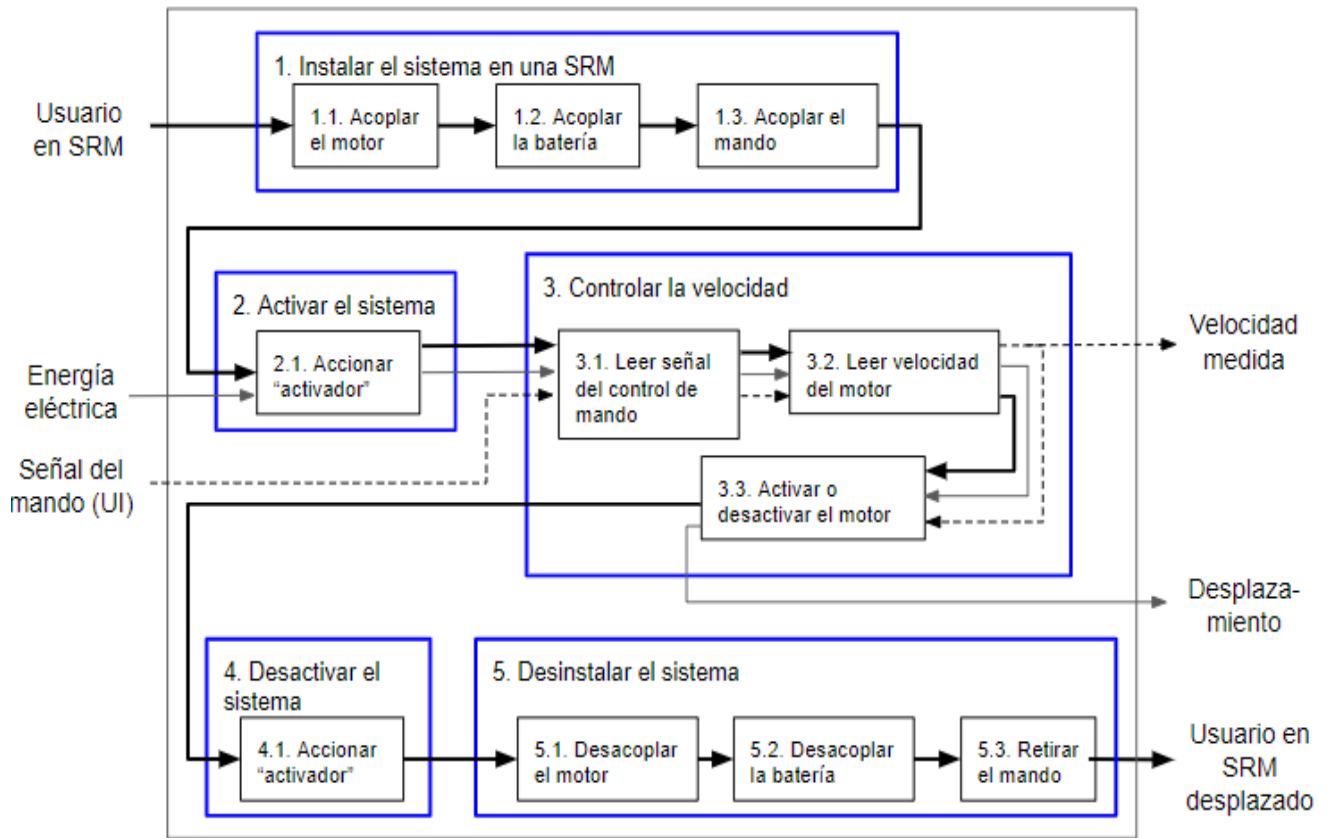


Figura 37. Caja transparente para el sistema de propulsión.

### 3.1.6 Alternativas de solución

Debido a su extensión, y para hacer la lectura de este documento más amigable con el lector, el detalle de las alternativas de solución se presenta en el Anexo 2. Allí se puede encontrar más información acerca de los conceptos presentados a continuación.



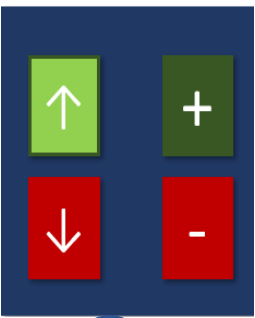












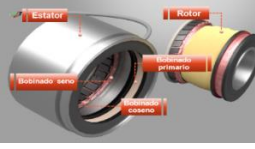

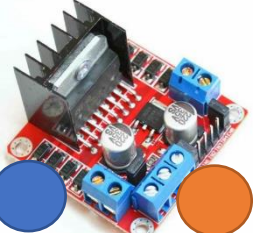


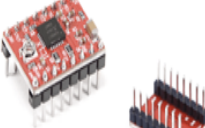








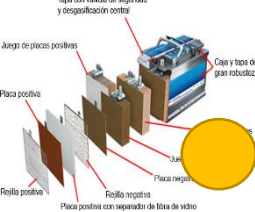

La Tabla 9 es la matriz morfológica, formada a partir de las alternativas de solución anteriores. Los diferentes "camino" o conceptos solución se marcan con círculos de diferente color.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 9. Matriz morfológica.

<b>Función</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b>Solución 4</b>
1.1. Acoplar el motor	 <p>Gancho a presión</p>	 <p>Motor hub - Permanente</p>	 <p>Motor hub - Removible</p>	 <p>Abrazadera</p>
1.2. Acoplar la batería	 <p>Variación 1: Bolsillo de plástico rígido</p>  <p>Variación 2: Bolsillo de tela</p>	 <p>Combinación soporte rígido y flexible</p>	 <p>Sistema conjunto motor - batería (fusionados)</p>	 <p>Sistema conjunto motor - batería (independientes)</p>
1.3. Acoplar el mando	 <p>Abrazadera permanente</p>	 <p>Eje en soporte con agujero</p>	 <p>Sistema motor + batería + mando</p>	 <p>Sistema vestible</p>
2.1. Accionar el activador	 <p>Botón de encendido</p>	 <p>Giro de cobertura del motor hub</p>	 <p>Switch o interruptor</p>	 <p>Sistema vestible</p>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

<p>3.1. Leer señal del control de mando</p>	 Joystick 	 Interfaz digital - Pantalla táctil 	 Botones (+ switch)   Perilla (+ switch)	 Rodillo acoplable a tubos delanteros 
<p>3.2. Leer la velocidad del motor</p>	 Tacómetro analógico 	 Tacómetro digital 	 Encoder 	 Resolver 
<p>3.3. Activar o desactivar el motor - Driver motor</p>	 Puente H  	 Drivers A4988 o DRV8825  		
<p>3.3. Activar o desactivar el motor - Fuente de energía</p>	 Batería de litio 	 Baterías de gel 	 Batería de ácido-plomo 	 Baterías AGM (Absorbed Glass Mat) 

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

<p>3.3. Activar o desactiva r el motor - Motor</p>	 <p>Motor DC con escobillas</p>	 <p>Motor DC sin escobillas</p>	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor paso a paso</p>
--	--	--	---	--

### 3.1.7 Selección de concepto

La Tabla 10 muestra los criterios escogidos para la selección de concepto, según el alcance del presente proyecto y consideraciones del autor. Se indica el nombre, una descripción, su peso o importancia en porcentaje y una descripción cuantitativa de la escala de calificación para cada criterio.

Tabla 10. Criterios de selección.

Criterios de selección			
Criterio	Descripción	%	Descripción cuantitativa
Seguridad	No representa riesgos o peligros para el usuario	15	1: No cuenta con esta característica
			2: Muy inseguro
			3: Inseguro
			4: Seguro
			5: Muy seguro
Costo	Tiene un costo competitivo en el mercado	20	1: Su precio es mayor a todos los dispositivos similares
			2: Su precio es mayor al de la mayoría los dispositivos similares
			3: Su precio es elevado, pero al nivel de otros sistemas
			4: Su precio es menor al de algunos de los dispositivos similares
			5: Su precio es menor al de la mayoría de los dispositivos similares
Buen desempeño	Tiene suficiente potencia para su funcionamiento en ambientes cotidianos	25	1: El sistema no es funcional en las situaciones cotidianas
			2: El sistema es poco funcional en las situaciones cotidianas
			3: El sistema es funcional en algunas situaciones cotidianas
			4: El sistema es funcional en la mayoría de las situaciones cotidianas
			5: El sistema es funcional en casi todas las situaciones cotidianas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Criterio	Descripción	%	Descripción cuantitativa
Facilidad de uso	El usuario puede manejar el sistema con facilidad	10	1: Todas las funciones del sistema son complicadas de utilizar incluso con la ayuda del manual
			2: Algunas funciones resultan complicadas para el usuario, aún con la ayuda del manual
			3: El manual es requerido para utilizar la mayoría de las funciones del sistema
			4: Las funciones básicas del sistema son intuitivas para el usuario, el manual es una ayuda para las más complejas
			5: El funcionamiento del sistema es intuitivo, el manual es una ayuda extra
Facilidad de ensamble	El sistema se acopla a la SRM con facilidad	10	1: El sistema no se logra ensamblar con la SRM estándar
			2: Sólo algunas partes del sistema logran ensamblarse y requiere herramientas sofisticadas
			3: Sistema es ensamblable sólo con herramientas sofisticadas
			4: Sistema es ensamblable con herramientas básicas
			5: Sistema es ensamblable sin herramientas
Control adecuado	El sistema de control tiene un margen de error mínimo	20	1: El sistema es lento e impreciso
			2: El sistema es lento y medianamente preciso
			3: El sistema es medianamente lento y medianamente preciso
			4: El sistema es medianamente lento, pero preciso
			5: El sistema es rápido y preciso

En la Tabla 11, se expone la matriz de puntuación. Cada concepto solución (columnas) se califica según las escalas de los criterios de selección (filas) anteriores, y luego se pondera según la importancia de este criterio. El concepto seleccionado es, entonces, el de mayor puntuación, que en este caso es el marcado con el color naranja.

Tabla 11. Matriz de puntuación.

MATRIZ DE PUNTUACIÓN		AZUL		VERDE		AMARILLO		NARANJA	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Seguridad	0.15	5	0.5	4	0.4	5	0.5	5	0.5
Costo	0.2	3	0.6	4	0.8	3	0.6	4	0.8
Buen desempeño	0.25	5	1.5	3	0.9	3	0.9	5	1.5
Facilidad de uso	0.1	3	0.3	3	0.3	5	0.5	4	0.4
Facilidad de ensamble	0.1	3	0.3	5	0.5	4	0.4	4	0.4
Control adecuado	0.2	3	0.6	5	1	4	0.8	3	0.6
Total	1		3.8		3.9		3.7		4.2

En la Tabla 12, se muestra un resumen de las características del concepto solución seleccionado. Se trata, entonces, de un SAP que se acopla a la SRM por medio de abrazaderas, que funcionan como adaptadores. Estas podrían retirarse después de cada

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

uso o permanecer ajustadas a la SRM mientras esta se usa de forma convencional, incluso si se retira el resto del SAP.

*Tabla 12. Concepto solución.*

<b>Función</b>	<b>Concepto ganador</b>
1.1. Acoplar el motor	Abrazadera
1.2. Acoplar la batería	Sistema conjunto motor - batería (independientes)
1.3. Acoplar el mando	Eje en soporte con agujero
2.1. Accionar el activador	Botón
3.1. Leer señal del mando de control	Joystick
3.2. Leer la velocidad del motor	Encoder
3.3. Activar o desactivar el motor - Driver motor	Puente H
3.3. Activar o desactivar el motor - Fuente de energía	Batería de litio
3.3. Activar o desactivar el motor - Motor	Motor DC con escobillas

La batería, el motor y el sistema de engranajes serán dispositivos independientes, lo que facilita su funcionamiento y el remplazo de partes individuales en caso de daños. Estos estarán contenidos en una misma “carcasa” o estuche, que le permite al usuario manipularlos fácilmente como una sola unidad.

El mando de control o interfaz con el usuario será un joystick, que durante varios años se ha posicionado como una herramienta fácil de manejar, sensible y modificable a las habilidades de diferentes personas. Para acoplarlo a la SRM se usará un soporte que se ajuste de forma permanente a la SRM, y que tenga un agujero donde se acopla el resto del sistema.

El activador será un botón, que únicamente cumple la función de activar el sistema electromecánico cuando el usuario desee usarlo. El hecho de que el sistema esté completamente inactivo a menos que se presione el activador permite ahorrar energía y al mismo tiempo dar mayor control y seguridad al usuario.

El motor seleccionado fue un motor DC con escobillas. Este, como se mencionó en las alternativas de solución, permitirá que el SAP funcione de forma eficiente, y a un bajo costo inicial, aunque requerirá mantenimientos por el desgaste de las escobillas. Para medir la velocidad de este motor se usará un encoder, como driver un puente H y para alimentarlo una batería de litio.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



### 3.1.8 Diseño en detalle

Partiendo del concepto solución descrito, se definieron otras características del modelo, intentando mantener en todo momento sus ventajas en cuanto a los criterios por los que fue seleccionado. Se priorizó, entonces, la estabilidad, simplicidad y fácil adquisición de sus partes, manteniendo estas en rangos comerciales.

En la Figura 38, se presenta el SAP diseñado. En términos generales, el dispositivo se basa en un cuerpo principal que contiene los elementos electromecánicos, dos ruedas, un sistema de ejes y unas abrazaderas que permiten acoplarlo a una SRM.

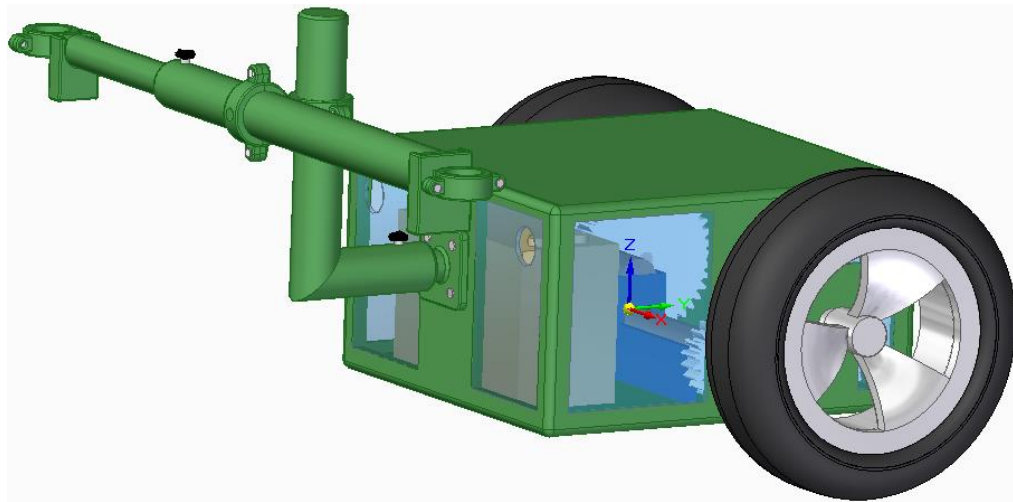


Figura 38. SAP diseñado.

A continuación, se hace una descripción más detallada de cada parte y se muestran algunas características en la Tabla 13, donde se indica el número que señala la parte en las figuras 39 y 40, su nombre, cantidad, material, origen, peso y precio. Para el origen, se usa una C para representar elementos comerciales de fácil adquisición en Colombia, y una P para indicar que son partes personalizadas. El peso y el precio mostrados son el total para todas las piezas de ese tipo, no por unidad.

Los planos de las partes personalizadas del sistema se pueden encontrar en el Anexo 3. La selección de su material se justifica con las simulaciones FEA realizadas en la tercera sección de resultados. Los planos de las piezas comerciales no se incluyen, pero sus dimensiones fueron aclaradas en su descripción.

- Caja: cuerpo principal del SAP que alberga los componentes electromecánicos (piñones, motores y batería). El marco está hecho de ABS de mediano impacto y ofrece la rigidez necesaria, no sólo para sostener el peso de los elementos en su interior, sino para mantener su forma ante las cargas que transmite el sistema de ejes.

Los recortes o “ventanas” de la caja están hechas en acrílico, y se diseñaron para ofrecerle un aspecto más estético al SAP, además de ayudar a reducir su peso. Estos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

también cuentan con orificios circulares en los paneles frontal y trasero para permitir la circulación del aire y evitar el sobrecalentamiento del sistema.

- Motor y batería: su elección se explica más adelante.
- Soporte del motor: diseñado en ABS según las dimensiones del motor elegido. Ayuda a mantener el eje alineado con el piñón, mientras mantiene las piezas ordenadas dentro de la caja.
- Piñones: son una de las piezas más pesadas pues fueron diseñadas en acero inoxidable para resistir el torque ejercido sobre estos. Se diseñaron usando la herramienta de piñones de Solid Edge, que verifica su viabilidad. Tienen una relación de 2:1, una distancia entre centros de 70 mm, y un espesor de 15 mm.
- Ruedas: se usó una rueda comercial de 8 pulgadas de diámetro y 2.5 pulgadas de ancho de banda (espesor). Su rin y eje son metálicos (en este caso en aluminio) y la llanta en polietileno. Se podrían usar ruedas de carretilla o que formen parte de otros sistemas como muebles o repisas móviles de este diámetro. Para no afectar el funcionamiento del dispositivo, se tendría que mantener el diámetro, y asegurar que la rueda tenga la resistencia suficiente para las cargas que actuarían sobre ella.

Por ejemplo, se podría usar una rueda NF 7094040 marca IMSA, que cuenta con centros de distribución en Medellín (IMSA, 2016). Ruedas robustas como estas serían las indicadas para los terrenos más difíciles e inestables o para los usuarios más pesados. Estas tienen una capacidad de carga máxima de 150 Kg (IMSA, 2016).

- Eje de acople: estructura en ABS que une a la base o caja con el sistema de ejes. Se fija a la caja con tornillos M5.
- Eje vertical: eje en L que permite modificar la altura del sistema de acople para adecuarse a SRM más altas o bajas que el modelo estándar usado para el diseño. En su extremo inferior se inserta el eje de acople y se ajusta con una perilla. La perilla es comercial y en el modelo le define una cabeza de ABS y un eje M5 en aluminio.
- Eje horizontal: eje telescópico en ABS que, por su longitud ajustable, permite que el SAP se adecúe a SRM más anchas o estrechas que el modelo estándar usado. Se acopla al eje anterior por medio de una abrazadera doble en ABS, fijada con tornillos M5, de menor longitud a los anteriores.
- Abrazaderas SAP-SRM: elemento final del sistema de acople en ABS. Por el extremo cilíndrico se unen a los ejes verticales traseros de una SRM, y por el otro extremo permiten el acople del eje horizontal del SAP (variando según sus dimensiones).
- Mando de control: un joystick comercial y un soporte en ABS diseñado según las dimensiones del joystick seleccionado. Existen muchas opciones de joystick en cuanto a su precio, forma y tamaño, y cualquiera podría ser usado para este SAP pues todos

entregan una señal que indica qué tan inclinado está la palanca, que finalmente se traduciría en velocidad. Se podría usar, por ejemplo, el joystick XD4PA223 de 2 direcciones de Schneider, que tiene centros de distribución en muchas ciudades del país (Schneider, 2019).

*Tabla 13. Partes del SAP diseñado.*

<b>Número en figura</b>	<b>Nombre</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Material</b>	<b>Origen</b>	<b>Peso (Kg)</b>	<b>Precio (COP)</b>
1	Caja – Estructura	1	ABS	P	1.475	\$120.000
2	Caja - Recortes	7	Acrílico	P	0.231	\$40.000
3	Batería	1	Mezcla	C	1.2	\$616.900
4	Motor Maxon	2	Mezcla	C	0.34	\$1.436.567
5	Soporte motor	1	ABS	P	0.097	\$50.000
6	Piñones	4	Acero inoxidable	P-C	1.938	\$50.000
7	Ruedas	2	Aluminio - polietileno	C	1.6	\$100.000
8	Eje de acople	1	ABS	P	0.034	\$80.000
9	Tornillos M5	4	Aluminio	C	0.004	\$5.000
10	Eje vertical	1	ABS	P	0.161	\$80.000
11	Perilla de eje M5	2	Aluminio – ABS	C	0.002	\$10.000
12	Eje horizontal	1	ABS	P	0.22	\$100.000
13	Abrazadera doble eje-eje	1	ABS	P	0.021	\$100.000
14	Abrazaderas SAP-SRM	2	ABS	P	0.043	\$100.000
15	Tornillos M5 abrazaderas	8	Aluminio	C	0.008	\$10.000
16	Joystick	1	Mezcla	C	0.116	\$20.000
17	Soporte de joystick	1	ABS	P	0.1	\$50.000
-	Total	-	-	-	7.59	\$2.968.467

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

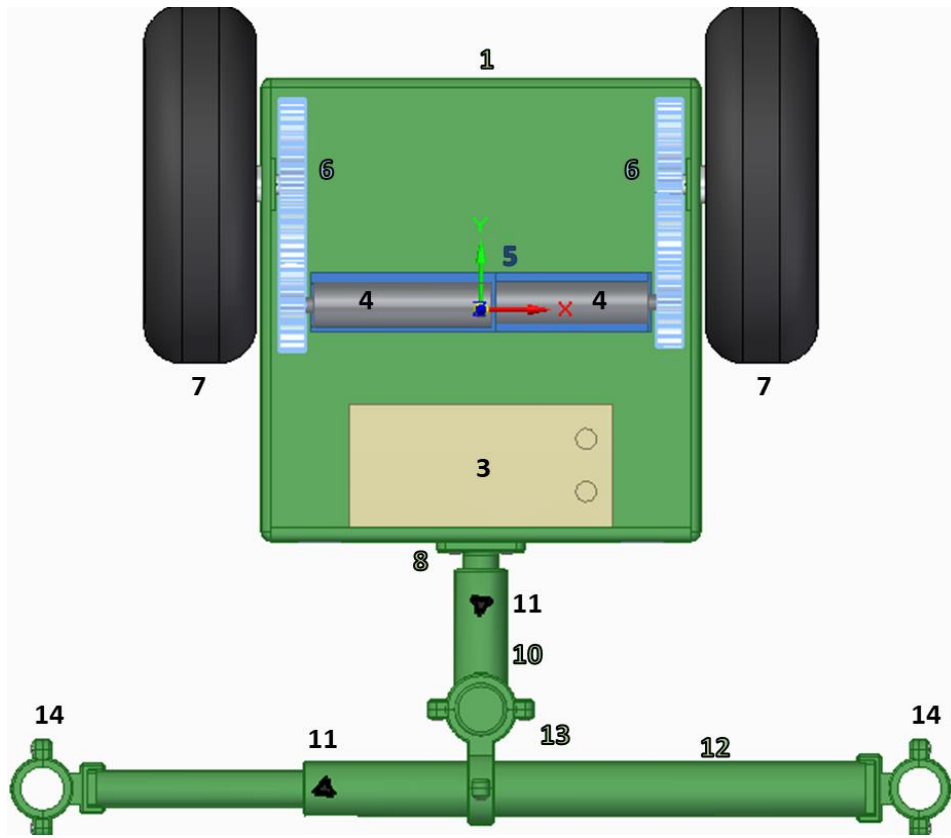


Figura 39. Vista superior del SAP abierto.

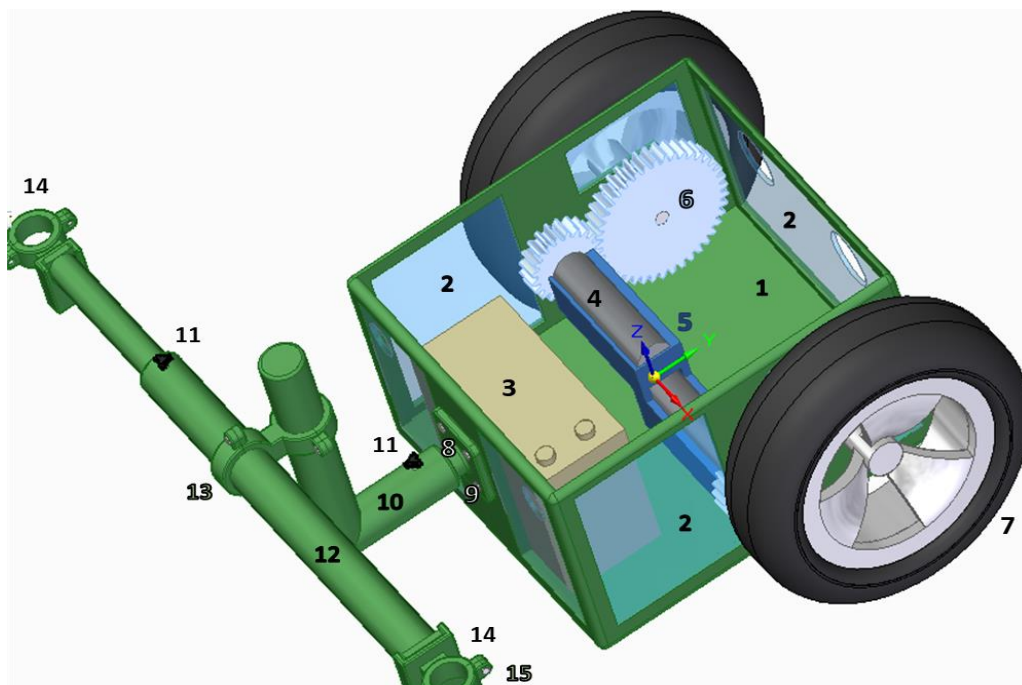


Figura 40. Vista isométrica del SAP abierto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A la hora de definir los materiales, se intentó mantener un buen balance entre resistencia, precio y peso. Se escoge el aluminio como material para los tornillos y perillas, que en las figuras se muestra plateado. Este tiene una buena resistencia manteniendo un peso bajo en comparación a otras opciones como acero o acero inoxidable. Sin embargo, por ser componentes tan pequeños, un tornillo de cualquier material con una resistencia igual o superior a la del aluminio podría servir, sin afectar significativamente el peso.

Para las piezas personalizadas, en verde en las figuras, se usa ABS de alto impacto porque es más económico y fácil moldear (impresión 3D) que otras opciones como el aluminio o el acero. Además, gracias al crecimiento de la impresión 3D, existen muchas alternativas de ABS reciclado, que cumplen con los estándares de calidad de este diseño. En Colombia, el mercado de la impresión 3D ha ido creciendo y actualmente hay varias empresas dedicadas a la impresión de piezas 3D en alta calidad (i3D, 2019; Ideas 3D, 2019; Universo 3D, 2019).

Ya con la forma, materiales, y funcionamiento del SAP, se calcularon los requerimientos en términos del motor. En la Figura 41, se muestra un esquemático del SAP acoplado a una SRM desplazándose por una pendiente de ángulo  $\alpha$ , a una velocidad  $v$ , cargando un peso  $W$  (masa del usuario y sus accesorios), y con ruedas de radio  $R_r$ .

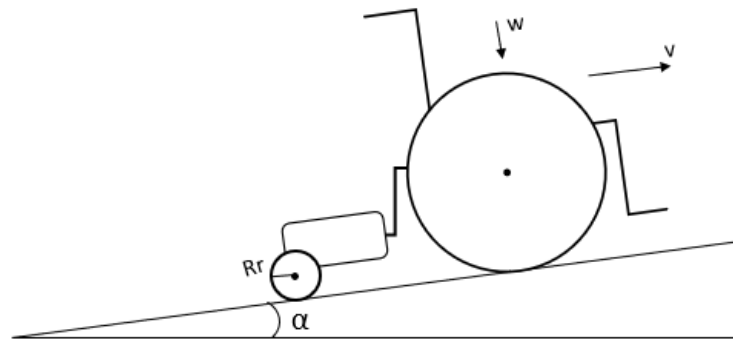


Figura 41. Diagrama del SAP acoplado a una SRM, mostrando variables de interés.

Se realizaron los siguientes cálculos para hallar el torque sobre las ruedas del SAP necesario para que el sistema pueda mover una silla de ruedas ( $T_r$ ). Se agrega una división por 2 al final, porque el sistema cuenta con dos ruedas independientes, cada una unida a su propio sistema de transmisión y motor, por lo que el torque requerido en cada rueda es la mitad del requerido para todo el sistema. Luego, se calcula el torque que debe generar cada motor ( $T_m$ ) para permitir el movimiento.

$$T_r = \frac{m * g * \sin \alpha * R_r}{2}$$

$$T_m = \frac{T_r * R_1}{R_2}$$

En la Tabla 14, se muestran las variables implicadas en los cálculos anteriores. La velocidad e inclinación surgen directamente de los requerimientos planteados. La masa total incluye el peso del usuario, sus accesorios, la SRM y el peso propio del SAP (descrito más

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

adelante). Se hallan, entonces, la relación de piñones adecuada, el torque y las RPM necesarias en las ruedas, y los valores mínimos de torque y RPM que debe tener el motor seleccionado.

Tabla 14. Variables en el cálculo de requisitos de los motores.

<b>Datos</b>	Velocidad	v	6 km/h
	Inclinación	$\alpha$	10°
	Masa total	m	120 kg
	Radio rueda	Rr	203,2 mm
	Aceleración de la gravedad	g	9.8 m/s <sup>2</sup>
<b>Variables intermedias</b>	Relación radios	R1:R2	1:2
	Torque en rueda	Tr	20.47 Nm
	RPM rueda	RPMr	78.32 rpm
<b>Requerimientos del motor</b>	Torque en motor	Tm	10.37 Nm
	RPM motor	RPMm	39.16 rpm

La configuración de piñones resultante se muestra en la Figura 42. El círculo más pequeño, de radio R1, representa el piñón que va unido al eje del motor, sobre el que se ejerce un torque Tm (en verde). El círculo más grande, de radio R2, es el piñón que va unido al eje de la rueda, sobre el que se traduce un torque Tr (azul).

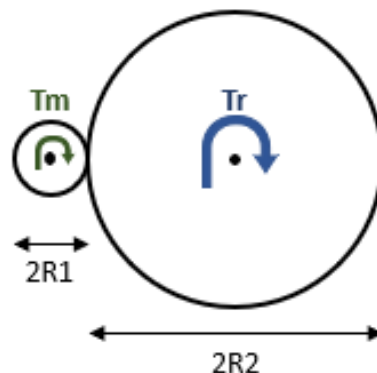


Figura 42. Configuración de los piñones.

El mayor problema en el desarrollo del presente trabajo fue la búsqueda de un motor adecuado. Después de varias modificaciones al diseño, se tomó la decisión de usar un motor importado, pues en Colombia no se pudieron encontrar motores que cumplieran con todos los requerimientos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En el portal web Mercado Libre, por ejemplo, se encontró el motor “Bemonoc Reversible Electric High Torque Dc 24” (MercadoLibre, 2019). Este tiene un torque de 9 Nm, por lo que podría satisfacer este requerimiento si se disminuye el peso máximo soportado a unos 100 Kg, que podría ser funcional para algunos usuarios. Sin embargo, funciona a un máximo de 6 RPM, por lo que no podría ni acercarse a la velocidad máxima establecida de 6 km/h.

Así, aunque el motor importado hace que no todas las partes tengan distribución en Colombia, y a la vez se aumenta el precio del SAP, este garantiza el cumplimiento de otras especificaciones de diseño más funcionales.

Se usa, entonces, un motor DCX26L GB KL 12V con el motorreductor GPX26HP 231:1 de Maxon Group (Maxon Group, 2019), que se muestra en Figura 43. En la Tabla 15, se observa que cumple con las especificaciones propuestas. Además, tiene un tamaño muy conveniente, con un diámetro de 26 mm y una longitud de 121.1 mm (incluyendo el eje).



Figura 43. Motor DCX26L GB KL 12V con motorreductor GPX26HP 231:1 (Maxon Group, 2019).

Tabla 15. Características del motor.

Requerimiento	Valor calculado	Motor Maxon Group
Torque	10.37 Nm	10.626 Nm
RPM	39.16 rpm	45.89 rpm

Teniendo los requerimientos eléctricos del motor, se puede definir entonces la batería. Se seleccionó una batería modelo DLFP14L-BS de la marca TPE, con distribución en Colombia. Esta es una batería de litio de 12 V y 20 Ah, con dimensiones 149mm x 87mm x 145 mm.

El motor seleccionado consume aproximadamente 3.5 A, por lo que se podría estimar que, con esta batería de 20Ah, la carga duraría 5.7 horas. Además, conociendo que el radio de las ruedas es de 0.1m y que el SAP funcionaría a un máximo de aproximadamente 40 rpm, se puede concluir que la distancia recorrida por carga es de unos 8.6 Km.

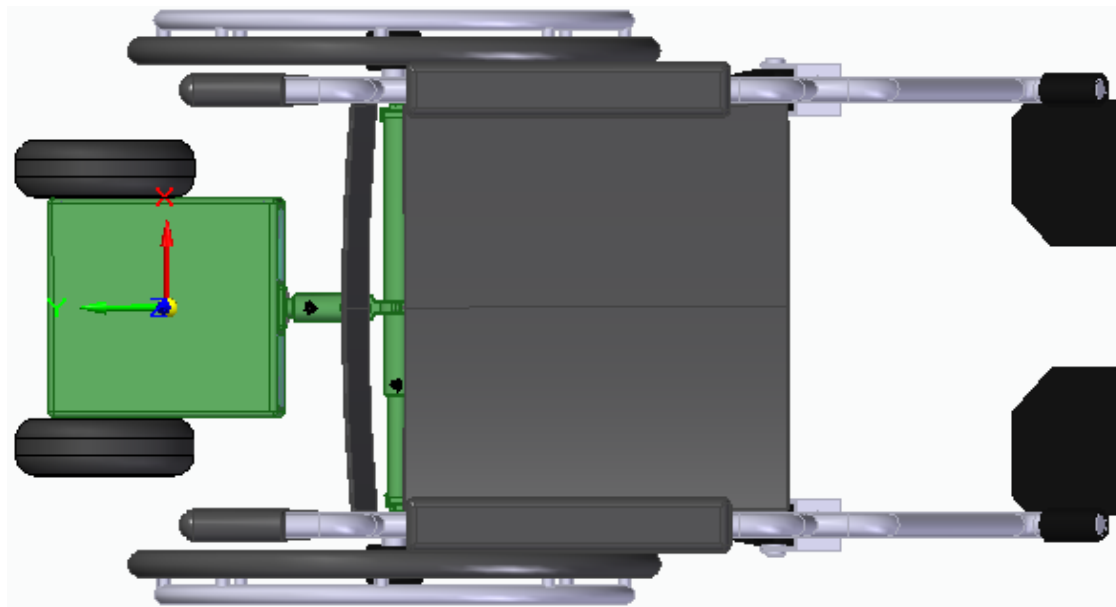
Luego de tener el modelo del SAP completo, se descargó un modelo de SRM estándar, corroborando sus partes y dimensiones. Las longitudes y alturas del sistema de ejes ajustables del SAP diseñado se modificaron, justo como se harían en un prototipo real, para acomodarse a la SRM en cuestión. En las figuras 44, 45 y 46, se muestran las vistas lateral, superior e isométrica del acople entre el SAP diseñado y una SRM.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.





*Figura 44. Vista lateral del SAP acoplado a una SRM.*



*Figura 45. Vista superior del SAP acoplado a una SRM.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.





*Figura 46. Vista isométrica del SAP acoplado a una SRM.*

### **3.2 DISEÑAR EL SISTEMA DE CONTROL PARA EL SOPORTE EN LÁPROPULSIÓN DE SRM.**

#### **3.2.1 Identificación de la planta**

Esta sección comienza con la construcción del “Control loop” (Figura 47). Se usó un Express VI Digital Output para indicar la dirección de giro al motor, con una señal en alto y otra en bajo. Luego, se calculó la velocidad a partir de la lectura del encoder con un Express VI.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



El archivo obtenido fue llevado a Excel y se graficó la velocidad respecto el ciclo de trabajo (Figura 49). Se escogió el rango de ciclo de trabajo (un sólo escalón) donde la velocidad tuvo el mayor cambio, que en la figura se muestra con una llave naranja. Este es el rango donde la ganancia es mayor, y por tanto donde el error es mayor, por lo que los siguientes cálculos se hicieron con estos valores, luego de eliminar el offset de velocidad y setpoint.

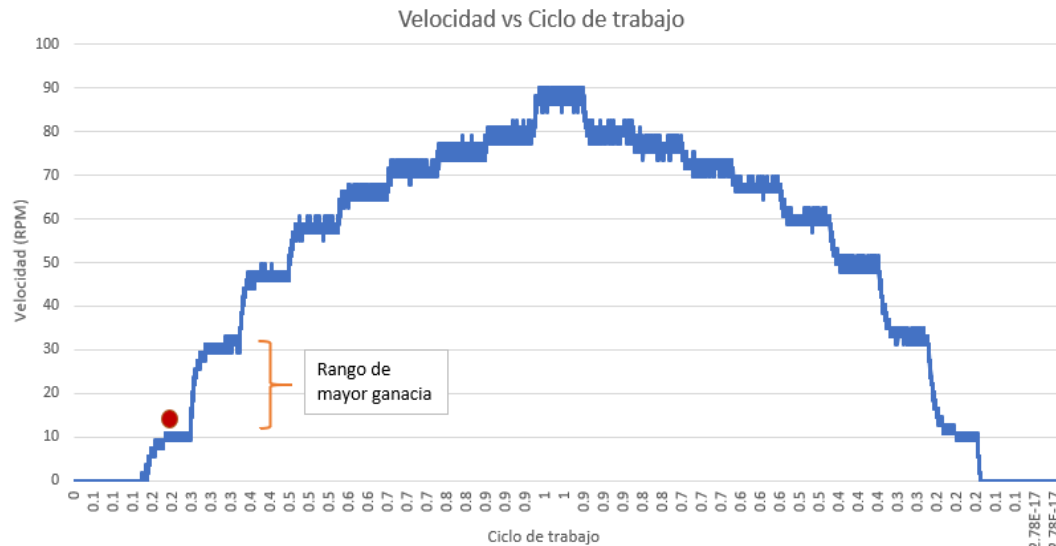


Figura 49. Velocidad del motor según la variación del ciclo de trabajo.

Después de importar estos valores al System Identification Toolbox de MATLAB, se construyeron diferentes modelos. En la Figura 50, se muestran dos de estos, el “tf5” en morado y el “tf2” en verde, que se acomodan a los datos medidos (negro). Idealmente, se escogería el de mayor porcentaje de alineación a la estimación (*fit to estimation data*), que es el modelo “tf5”, con un 94.33%, 2 polos y 2 ceros. Sin embargo, para conservar un diseño fácil de implementar y modificar, se seleccionó el modelo “tf2”, que es mucho más simple, con sólo 1 polo, y su porcentaje de alineación sigue siendo bueno (90.24%).

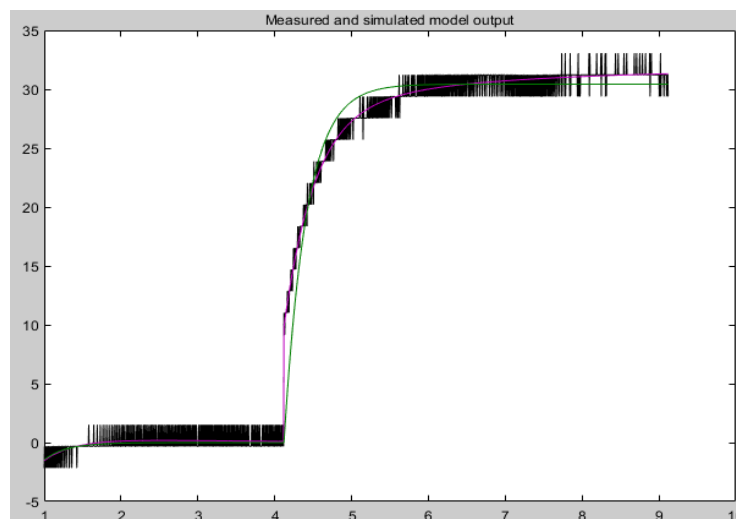


Figura 50. Modelos construidos en System Identification.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La función de transferencia de la planta seleccionada (Ecuación 13), se llevó a la forma de la Ecuación 14, donde se puede analizar en términos de tiempo, para obtener la  $G_p(s)$  final en la Ecuación 15.

$$G_p(s) = \frac{1044}{s + 3.431} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$G_p(s) = \frac{304.3}{0.2915 s + 1}, \text{ con } k = 304.3 \text{ y } \tau = 0.2915 \quad \text{Ecuación 15}$$

### 3.2.2 Selección del controlador

Para este caso, se seleccionó un controlador PI. Su parte P ayuda al ajuste de la ganancia del sistema, mientras la acción integral minimiza el error en estado estable, que corresponde al principal criterio tenido en cuenta para el control de velocidad. Esto es posible ya que  $G_p(s)$  es una función tipo 0, cuya respuesta a un escalón en lazo cerrado tiene un error finito, no nulo, en estado estable. Al aumentar el tipo a 1, este error se vuelve cero (remitirse al marco teórico).

Usando el diagrama de bloques de la Figura 51, se observa que los bloques P, I, y D están en paralelo, por lo que se sumaron para obtener  $G_C(s)$  (Ecuación 16). Al tratarse de un controlador PI, el bloque D se hace cero.

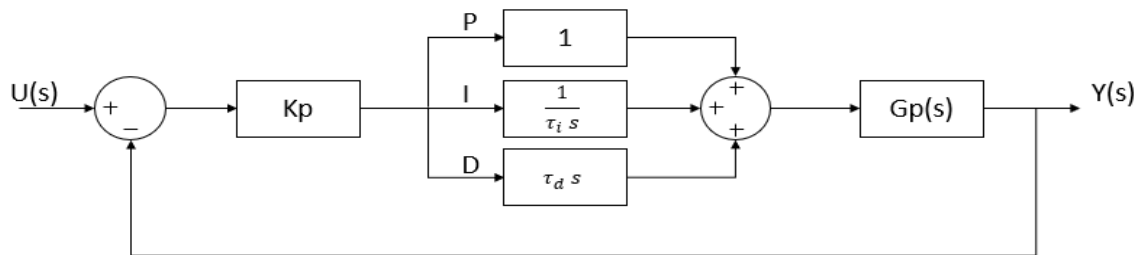


Figura 51. Diagrama de bloques del sistema con controlador.

$$G_C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

### 3.2.3 Diseño del controlador

Objetivos de diseño:

- $M_p = 5\%$
- $e_{ee} = 0$
- $t_s = 0.6 (t_{sla})$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El  $t_{sla}$  se obtuvo graficando la respuesta al escalón de  $Gp(s)$  en MATLAB y marcando la variable "Settling time". En este caso,  $t_{sla} = 1.14$ .

Polinomio característico: Resolviendo la Ecuación 12, se halló  $G_{dlc}$  y luego se normalizó su denominador  $B_c(s)$  (Ecuación 17).

$$G_{dlc} = \frac{608600 Kp Ti s + 608600 Kp}{583 Ti s^2 + (2000 Ti + 608600 Kp Ti) s + 608600 Kp}$$

$$B_c = 583 Ti s^2 + (2000 Ti + 608600 Kp Ti) s + 608600 Kp$$

$$B_c = s^2 + \frac{3,430531732 (Ti + 304,3 Kp Ti)}{Ti} s + \frac{1043,910806 Kp}{Ti} \quad \text{Ecuación 17}$$

Criterio de Routh-Hurwitz: Primero, se tomaron los coeficientes del polinomio  $B_c(s)$ :

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= \frac{3.431 (\tau_i + 304.3 K_p \tau_i)}{\tau_i} \\ C &= \frac{1043.91 K_p}{\tau_i} \end{aligned}$$

Se formó la matriz propia del criterio:

$$\begin{array}{l|ll} s^2 & A & C \\ s^1 & B & \\ s^0 & C_1 & \end{array}$$

Para hallar el coeficiente  $C_1$ :

$$C_1 = -\frac{\begin{vmatrix} A & C \\ B & D \end{vmatrix}}{B} = -\frac{\begin{vmatrix} A & C \\ B & 0 \end{vmatrix}}{B} = -\frac{0 - B C}{B} = \frac{B C}{B} = C$$

Finalmente, se obtuvo esta matriz:

$$\begin{array}{l|ll} s^2 & A & C \\ s^1 & B & \\ s^0 & C & \end{array}$$

Según el criterio de Routh-Hurwitz, el número de raíces inestables de  $B_c(s)$  es igual al número de cambios de signo en la primera columna del arreglo resultante. Es decir, los coeficientes de  $B_c(s)$  y los de la primera columna del arreglo (A, B, C) deben ser positivos para que el sistema descrito sea estable.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$A > 0 \rightarrow 1 > 0 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$B > 0 \rightarrow \frac{3.431 (\tau_i + 304.3 K_p \tau_i)}{\tau_i} > 0 \rightarrow \text{Cumple si } K_p > -0.0033$$

$$C > 0 \rightarrow \frac{1043.91 K_p}{\tau_i} > 0 \rightarrow \text{Cumple si } \frac{\tau_i}{K_p} < 1044$$

El resultado obtenido es que el criterio de Routh-Hurwitz se cumple, es decir, el sistema es estable, si  $\frac{\tau_i}{K_p} < 1044$  y  $K_p > -0.0033$ , lo que verifica la estabilidad del sistema diseñado.

Polinomio deseado: Se definió partiendo de la forma estándar Ecuación 18.

$$B_d(s) = s^2 + 2 \omega_n \xi s + \omega_n^2 \quad \text{Ecuación 18}$$

La frecuencia y el coeficiente de amortiguamiento se hallaron a partir de las ecuaciones Ecuación 8, Ecuación 9 y Ecuación 10, y usando valores definidos en los criterios de diseño:

$$M_p = e^{-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$0.05 = e^{-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$\xi = \mathbf{0.6901067306}$$

$$t_s = 0.6 t_{sla} = 0.684$$

$$\omega_n = \frac{4.6}{t_s \xi} = 9.745081306$$

Entonces, el polinomio deseado es (Ecuación 19):

$$B_d(s) = s^2 + 13.4502924 s + 94.96660965 \quad \text{Ecuación 19}$$

Parámetros del controlador: Se encontraron los parámetros  $K_p$  y  $\tau_i$ , usando MuPAD.

$$\text{Coeficientes } B_C(s) = \text{Coeficientes } B_d(s)$$

$$K_p = 0.009598291929$$

$$\tau_i = 0.1055082487$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

De acuerdo con esto, la función de transferencia del controlador es (Ecuación 20):

$$G_c = \frac{0.001013s - 0.009598}{0.1055s} \quad \text{Ecuación 20}$$

Discretización: Usando la función *c2d*, con la transformación bilineal de Tustin, se llega a la función del controlador discretizada (Ecuación 21).

$$G_c[z] = \frac{0.01005 z - 0.009143}{z - 1} \quad \text{Ecuación 21}$$

Ecuación en diferencias: A partir de la Figura 52, se modifica  $G_c[z]$  para quedar en términos de  $E[z]$  y  $Up[z]$ . Luego se multiplica por  $\frac{z^{-1}}{z-1}$ , se reemplaza la  $z$  por  $k$ , se despeja  $U[k]$ , y se obtiene la ecuación en diferencias (Ecuación 22).

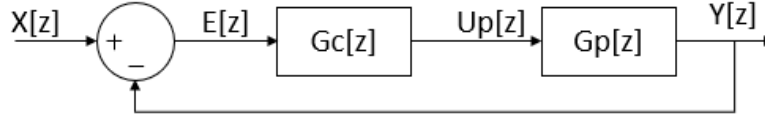


Figura 52. Diagrama de bloques para el sistema discretizado.

$$G_c[z] = \frac{Up[z]}{E[z]} = \frac{0.01005 z - 0.009143}{z - 1} \left( \frac{z^{-1}}{z^{-1}} \right)$$

$$U[z] - U[z] (z^{-1}) = 0.01005 E[z] - 0.009143 E[z] z^{-1}$$

$$U[k] = U[k - 1] + 0.01005 E[k] - 0.009143 E[k - 1] \quad \text{Ecuación 22}$$

### 3.3 VERIFICAR EL DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO Y DE CONTROL MEDIANTE SIMULACIONES

#### 3.3.1 Simulación de la respuesta del controlador

A continuación, se presentan los resultados de estimular las funciones de transferencia  $G_p$  y  $G_{dlc}$  con un escalón unitario para verificar su comportamiento. En la Figura 53, se muestra la respuesta de la planta. Es un sistema de primer orden, sin ceros, por lo que no presenta ningún tipo de oscilación. Se observa en la figura que tiene un tiempo de estabilización de 1.14 segundos, y un pico de amplitud de 304.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

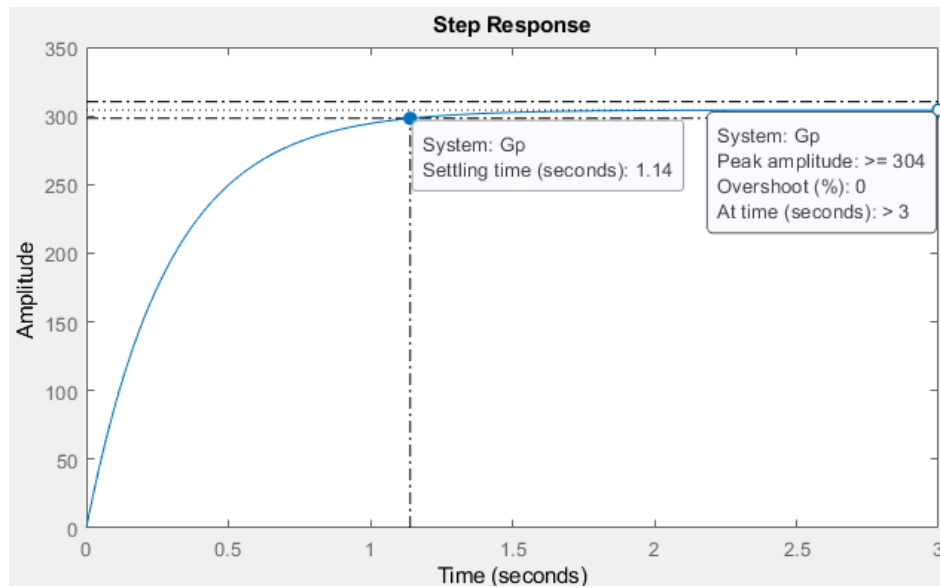


Figura 53. Respuesta de  $G_p$  al escalón unitario.

En la Figura 54, se muestra la respuesta del sistema en lazo cerrado  $G_{dlc}$ . Es un sistema de segundo orden, subamortiguado y estable. Converge al valor esperado que en este caso es de 1, por la estimulación del escalón unitario, en aproximadamente medio segundo.

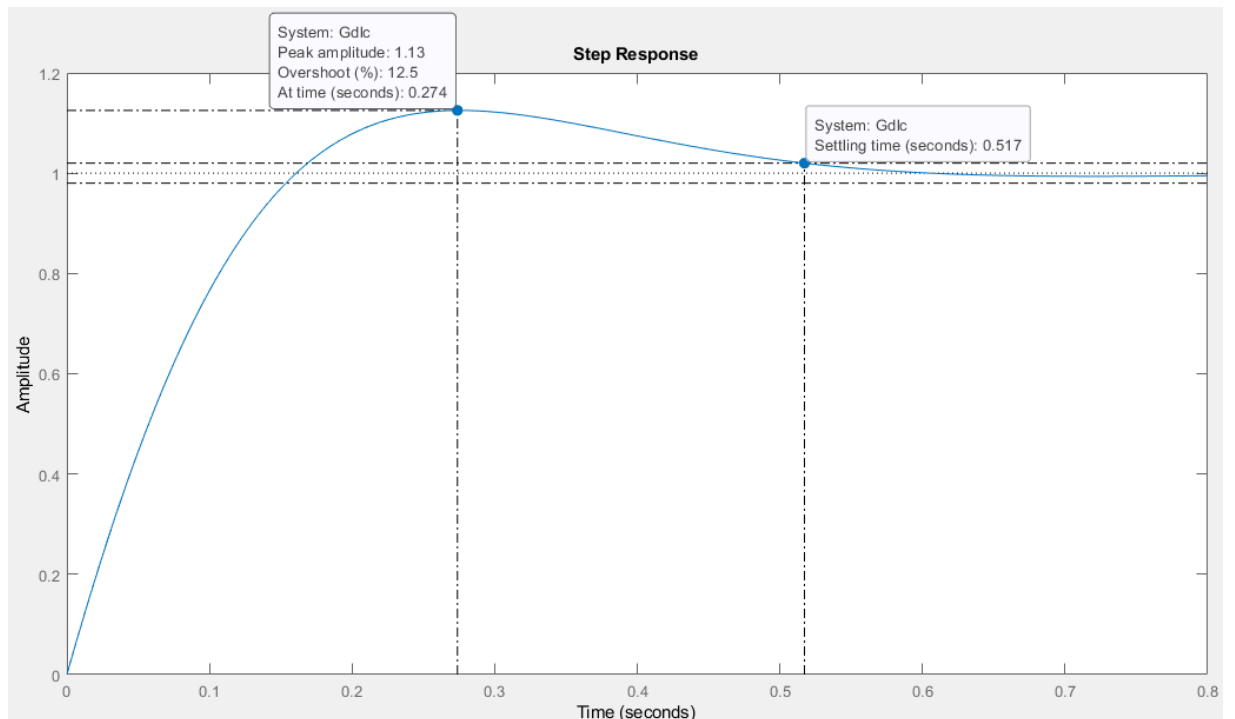


Figura 54. Respuesta de  $G_{dlc}$  al escalón unitario.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



### 3.3.2 Evaluación del desempeño y de la estabilidad del controlador

Se diseñó el controlador con un máximo sobreimpulso de 5%, que significa que el máximo sobrepico sería 1.05, porque el sistema fue excitado con un escalón unitario. En la Figura 54, se observa que el pico máximo de amplitud es de 1.13. El error calculado es 7.62%, que se considera adecuado para esta aplicación, pues una velocidad ligeramente menor o mayor, no representa un peligro para el usuario y no afecta componentes del dispositivo.

$$\% \text{ Error pico sobreimpulso} = \left| \frac{1.13 - 1.05}{1.05} \right| * 100 \% = 7.62 \% \quad \text{Ecuación 23}$$

El tiempo de estabilización deseado fue del 60% de 1.14, es decir, 0.684 segundos. El obtenido por la simulación fue de 0.517 segundos. El error obtenido es de 24.4%, que puede parecer alto. Sin embargo, el tiempo obtenido en la simulación es menor, que para la presente aplicación es beneficioso.

$$\% \text{ Error tiempo de estabilización} = \left| \frac{0.517 - 0.684}{0.684} \right| * 100 \% = 24.4 \% \quad \text{Ecuación 24}$$

Respecto al ensayo que se hizo con el motor real, en la Figura 55 se presenta el “Control loop” del programa de Labview. Como en el programa anterior, se le indica la dirección al motor por medio de un Express VI Digital Output. Se calculó la velocidad a partir de la lectura del encoder, y se usó esta medición y el valor de velocidad ingresado por el usuario (“setpoint”) para controlar la velocidad con la ecuación en diferencias (Ecuación 22).

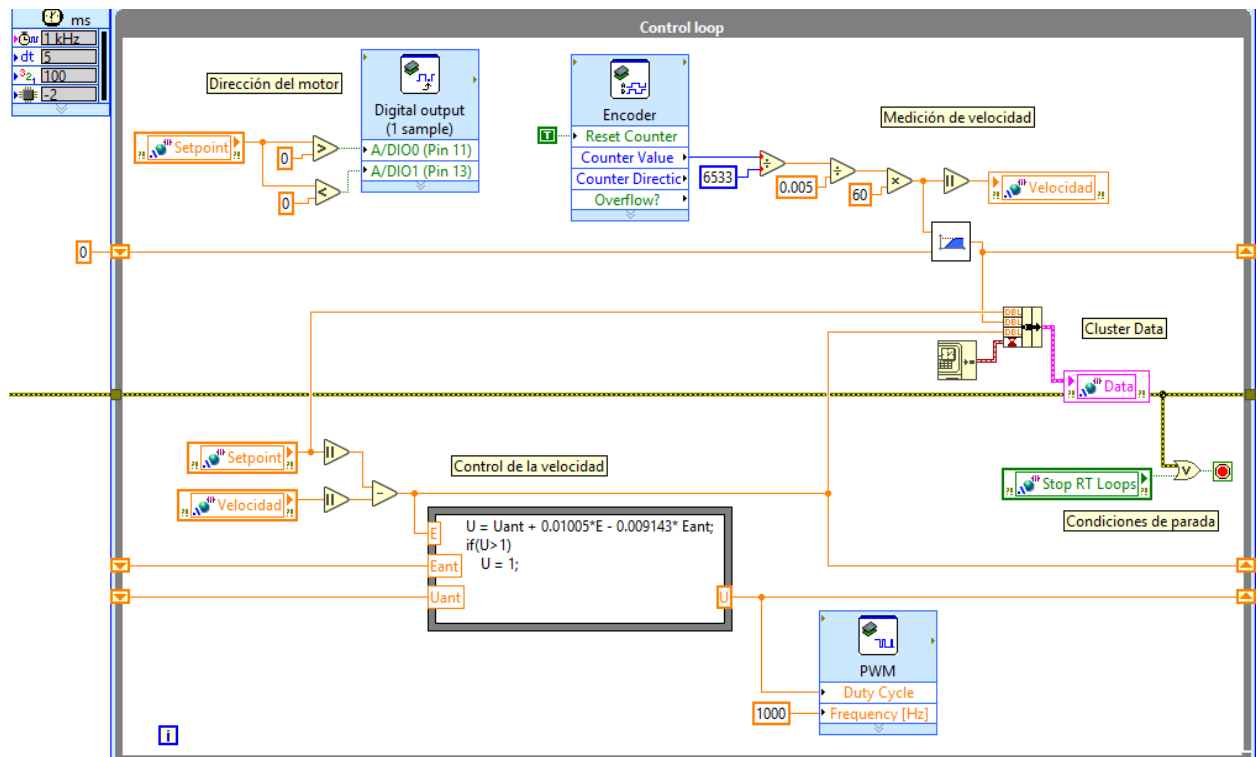


Figura 55. "Control loop" del programa de Labview para evaluación del controlador.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la Figura 56, se muestran las variables setpoint (blanco), velocidad (rojo) y error (verde). A la derecha de la gráfica, se muestran los valores de estas tres variables, en este mismo orden, en un momento de tiempo dado. Se observa que efectivamente se modifica la velocidad del motor hasta alcanzar el valor que se encuentra en la variable setpoint. A la vez, el valor del error se acerca a cero, a medida que la velocidad se acerca al valor esperado.

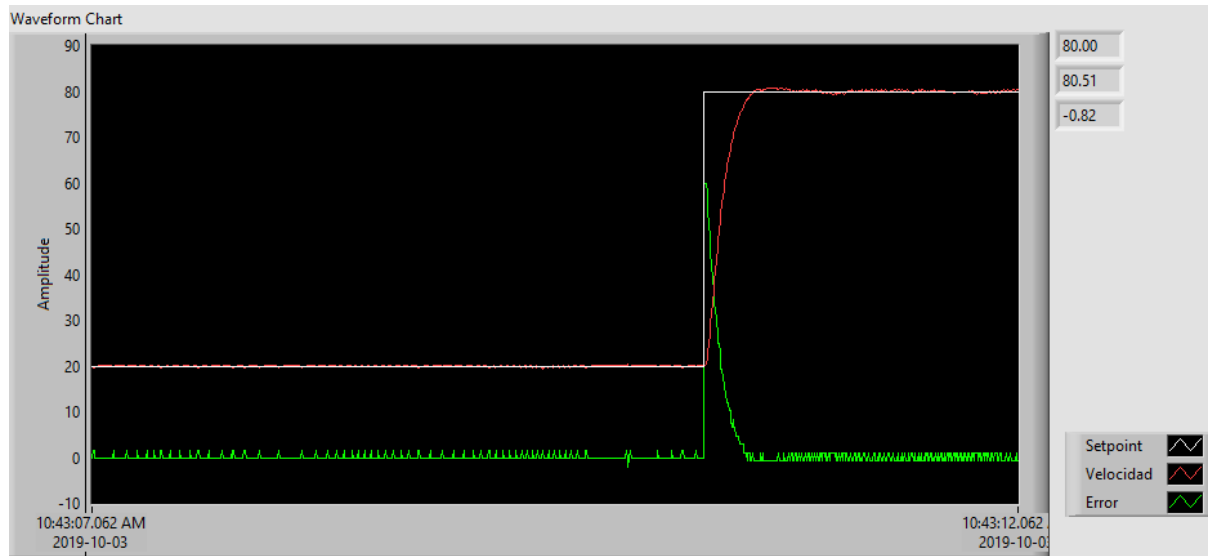


Figura 56. Control de la velocidad del motor en Labview.

Se aprecia un pico de sobreimpulso y unas oscilaciones previas al momento de estabilización, tanto en la curva de velocidad como en la del error. El comportamiento de estas dos curvas debe ser similar, como se observa, porque el error resulta de la resta entre el valor de velocidad al que el controlador espera llegar, un valor estático, y el que recibe de la velocidad en todo momento. Es decir, ambas curvas están determinadas por el comportamiento de la velocidad del sistema.

### 3.3.3 Simulación por elementos finitos de los sistemas mecánicos

En la Figura 57, se muestra el análisis de esfuerzos del SAP en Solid Edge. Se usó una versión simplificada del modelo donde no se incluyen elementos electromecánicos pues estos tienen una acción estructural. Se incluyó una batería de masa de 1.1 Kg y se añadió una fuerza de 39.2 N que representa el peso de los dos motores, su soporte y los dos sistemas de transmisión. Esta fuerza actúa sobre el “piso” de la caja principal y equivale a una masa de 4 Kg, casi el doble de la masa real de estos elementos (2.38 Kg). Esto se hizo pensando en que otros motores pueden tener masas significativamente mayores.

Se añadió la acción de la gravedad para que el estudio tuviese en cuenta el peso propio del sistema. Se fijó la mitad externa de las abrazaderas SAP-SRM pues estas van fijadas a la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

SRM, y se aplicó una fuerza de 112.31 N a cada una en la otra mitad. Esta fuerza es la que el peso del usuario y su SRM ejercen sobre el sistema (204.2 N), más un 10% adicional como factor de seguridad. Se aplica un torque de 20.42 Nm a los ejes de las ruedas. Por último, se fija el eje de las ruedas, impidiendo sólo el desplazamiento, no la rotación, para indicar que estas están apoyadas sobre el piso.

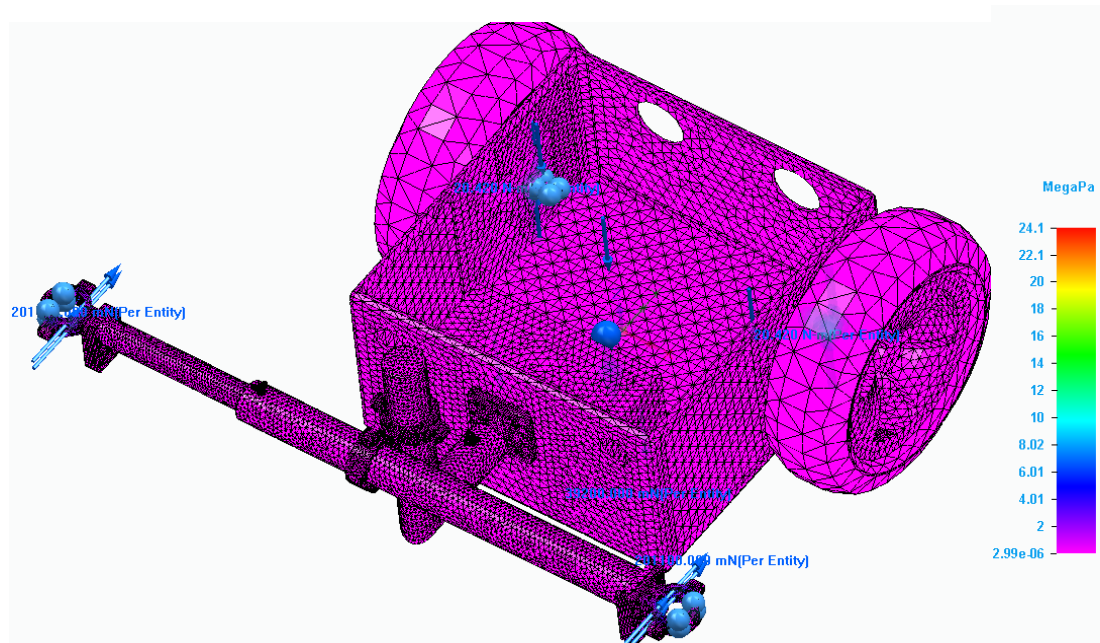
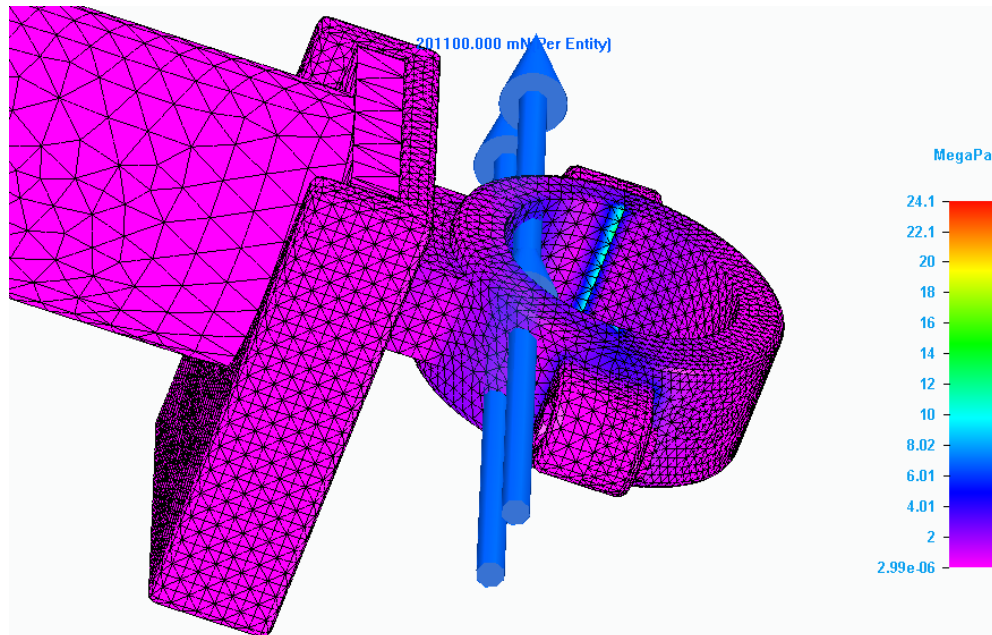


Figura 57. Análisis de esfuerzos en el SAP.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 58. Punto de mayor esfuerzo en el SAP.

A la derecha de la Figura 57, se muestra una barra de color que indica que el esfuerzo máximo encontrado fue de 24.1 MegaPa. Como era de esperarse, este ocurrió en las abrazaderas que unen el SAP a la SRM por la fuerza aplicada sobre ellas (Figura 58), y en los ejes de las ruedas por el torque que se genera sobre ellos.

El valor de 24.1 MegaPa es menor al esfuerzo de cedencia (yield stress) indicado para los materiales usados: la del aluminio es 289.580 MegaPa y la del ABS es 43.437 MegaPa (valores de Solid Edge). Por esto, se puede considerar que la forma y materiales del dispositivo diseñado son adecuados para sus propósitos.

En la Figura 59, se muestran los desplazamientos ocurridos en el SAP por las cargas aplicadas (las mismas del estudio de esfuerzos). El mayor desplazamiento ocurre en el eje vertical y es de apenas 0.146 mm, lo que no representa un peligro para el dispositivo ni modifica su funcionamiento.

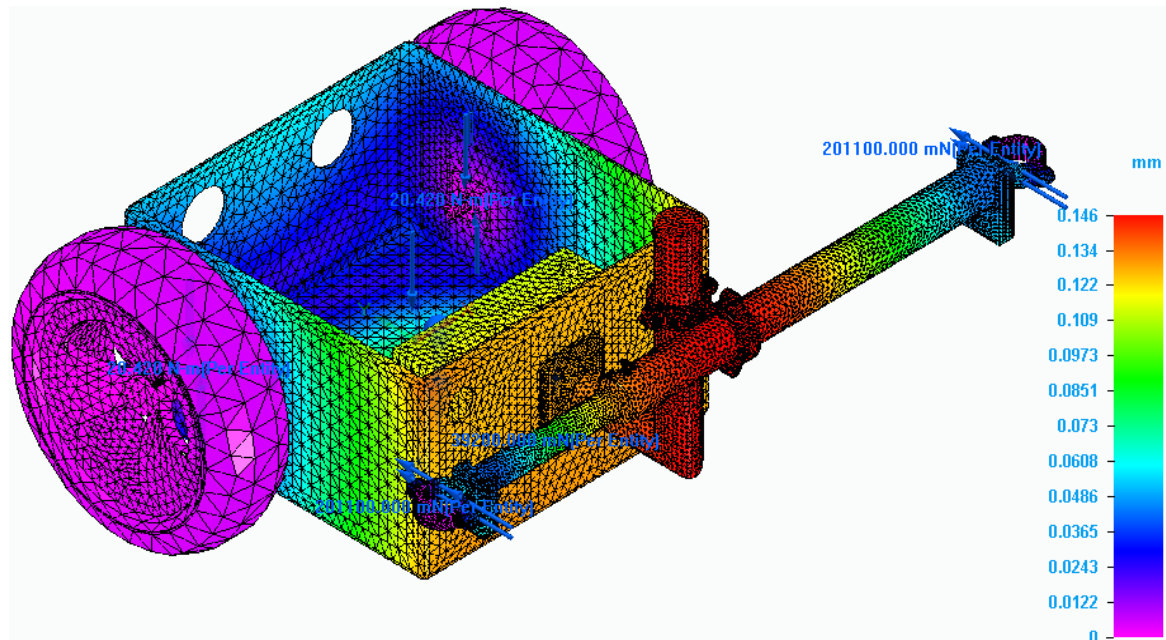


Figura 59. Análisis de desplazamientos en el SAP.

### 3.3.4 Comprobación general del diseño

En la Tabla 16, se muestran los requerimientos planteados al comienzo de este trabajo, el valor estimado se compara contra el valor diseñado u obtenido para analizar si se cumplió esta meta.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 16. Cumplimiento de requerimientos iniciales.

No.	Especificación	Unidad	Valor Estimado	Valor diseñado	Cumple
1	Velocidad máxima	km/h	6	6	Sí
2	Inclinación máxima soportada	°	10	10	Sí
3	Tiempo de instalación (aprox)	min	5	5	Sí
4	Masa de todo el sistema	Kg	<10	7.59	Sí
5	Costo de producción del sistema	USD	<500	864.47	No
6	Partes están disponibles en Colombia	Sí/No	Sí	No	No
8	Duración batería	horas	8	5.7	No
9	Distancia recorrida por carga de batería	km	15	8.6	No
10	Resistencia a condiciones exteriores	Sí/No	Sí	Sí	Sí
11	“Peso” soportado máximo	Kg	>100	120	Sí
12	Tiempo de procesamiento	s	<0.5	0.517	Sí
13	Error	%	<10	7.62	Sí
14	Seguridad	Subj.	>4 (/5)	4.2 (/5)	Sí
15	Sistema sencillo para graduar la velocidad	Sí/No	Sí	Sí	Sí
16	Interfaz amigable con el usuario	Sí/No	Sí	Sí	Sí

La configuración del sistema de transmisión de potencia y las características del motor utilizado permitieron cumplir con los requerimientos para el rango de velocidad, inclinación máxima, peso soportado y el peso propio del sistema.

Desafortunadamente, el mismo motor que permite una gran funcionalidad en un pequeño tamaño, también tiene dos desventajas principales. Al ser un producto importado, es la única pieza del sistema que no está disponible en Colombia, y es el mayor contribuyente al costo total de producción del sistema.

No obstante, es importante notar que el costo de producción de este SAP de \$864.47 USD o \$2.968.467 COP, sigue siendo mucho menor al de los otros SAP evaluados, que tuvieron

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

un precio promedio de \$11,833,000 COP, y algunos alcanzaron valores mayores a los \$20,000,000 COP.

La estructura del sistema mecánico permite un tiempo de instalación de aproximadamente 5 minutos, satisfaciendo este criterio. Cabe resaltar que esta variable se refiere al tiempo que una persona requiere para acoplar el SAP a la SRM cuando los elementos de acople ya han sido instalados. Es decir, no es la primera instalación, sino el acople del cuerpo principal del sistema (caja y ejes) a las abrazaderas SAP-SRM.

Los materiales y configuración del sistema mecánico o parte física del dispositivo satisfacen las especificaciones de masa total máxima y resistencia a condiciones exteriores. Sin embargo, como el ABS no es totalmente impermeable, se podría recubrir de una lámina plástica impermeable. Esto no incrementaría significativamente su peso ni costo, y ofrecería más resistencia a condiciones como la lluvia. El uso de un joystick convencional como mando de control y la simplicidad del diseño brindan un sistema sencillo para graduar la velocidad y una interfaz amigable con el usuario.

Los requerimientos de duración de la batería y de distancia recorrida por carga no se cumplen, pero se llegan a valores que permiten que el SAP diseñado sea funcional. Además, cabe resaltar que los valores hallados corresponden al funcionamiento máximo del dispositivo, es decir, cuando el motor está consumiendo el mayor amperaje posible. Sin embargo, si la carga (peso soportado), inclinación o velocidad son menores a los máximos planteados, se podría obtener una mayor duración de la carga y una mayor distancia por carga en el uso cotidiano del dispositivo.

El diseño del sistema de control permite tener un tiempo de procesamiento o tiempo de estabilización del sistema muy cercano al objetivo, con sólo 0.017 segundos de diferencia, que no es un valor significativo para esta aplicación.

Para el error, sólo se tuvo en cuenta el error hallado para el máximo sobreimpulso, y este está dentro del rango que se consideró aceptable. No se combinó con el error para el tiempo de estabilización porque, como se explicó anteriormente, este tiempo fue menor, así que, aunque el error puede parecer alto, un tiempo menor en esta aplicación es beneficioso.

Por último, a este SAP se le dio una calificación de 4.2 sobre 5 para el ítem de seguridad gracias al cumplimiento de requerimientos como el error, tiempo de procesamiento, la inclinación máxima soportada, la resistencia a condiciones exteriores y la interfaz intuitiva. Además, se realizaron las simulaciones necesarias para asegurar que tanto el sistema electromecánico como el de control funcionarán como se esperaba.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



## 4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En el presente trabajo se diseñó con éxito el componente electromecánico y el sistema de control para un sistema de asistencia a la propulsión de sillas de ruedas manuales. Se propuso una versión inicial de un dispositivo dirigido a evitar lesiones y mejorar la calidad de vida de usuarios de SRM.

La metodología de diseño de productos de Ulrich y Eppinger permitió establecer requerimientos que tienen en cuenta la visión personal de algunos usuarios y conocedores de SRM, y características de productos relacionados que están disponibles actualmente en el mercado colombiano e internacional. Además, se incluyeron algunos según el criterio del diseñador para garantizar la funcionalidad y seguridad del dispositivo.

Estos criterios sirvieron como guía para llegar a un sistema electromecánico robusto y adecuado para la propulsión de SRM. El modelo CAD realizado permite no sólo visualizar el SAP, sino definir las partes personalizadas, piezas comerciales, materiales y configuraciones necesarias para que este funcione correctamente.

El controlador PI diseñado demostró ser adecuado para el control de la velocidad de un motor DC como el utilizado. Aunque el motor especificado en el diseño en detalle no pudo ser adquirido, y por tanto no se usó este como planta a controlar, se mostró en las simulaciones que el protocolo descrito fue exitoso para este caso. Este mismo proceso podría ser llevado a cabo para la identificación de la planta o motor real, en caso de construirse un prototipo físico o en el diseño del controlador real.

El concepto solución final cumple la gran mayoría de objetivos y requerimientos planteados en la identificación de necesidades, y se llega a un diseño funcional con algunas limitaciones que quedan abiertas a futuras mejoras. Se podría, por ejemplo, encontrar otras opciones de sistemas de transmisión, motores y baterías que permitan obtener el mismo funcionamiento a un precio más bajo y con componentes disponibles en Colombia.

Además, futuros trabajos podrían analizar la viabilidad comercial de este producto, estudiar los métodos de producción más adecuados, observar su desempeño con un prototipo funcional y realizar los ajustes necesarios, entre otros.

Por último, cabe resaltar la importancia de realizar trabajos como este o de construir sobre los ya planteados, apuntando a formas sencillas de integrar a personas con diferentes habilidades en todas las dimensiones de la vida en sociedad. En la medida en la que se perfeccionen tecnologías de asistencia como la propuesta y se eliminen las múltiples barreras que impiden la participación, se podrá construir un mundo menos discapacitante.

## REFERENCIAS

- Abastecedor Ortopédico. (2019). Silla de Ruedas Eléctricas MERITS. Retrieved September 20, 2019, from <https://abastecedorortopedico.com/producto/silla-ruedas-electricas-merits/>
- ABM Industrial. (2012). ¿Qué es un encoder absoluto? ¿Cómo funciona? . Retrieved October 27, 2019, from <http://www.abm-industrial.com/2013/02/08/que-es-un-encoder-absoluto/>
- Alber-USA. (2019). E-Fix. Retrieved October 1, 2018, from <http://www.alber-usa.com/produkte-rollstuhl-zusatzantrieb/zusatzantriebe-fuer-rollstuehle/rollstuhlzusatzantrieb-efix.html>
- Alber. (2019a). e-fix. Retrieved October 1, 2018, from <https://www.alber.de/en/products/add-on-drive/e-fix/>
- Alber. (2019b). e-fix – the small compact electric wheelchair.
- Algood, S. D., Cooper, R. A., Fitzgerald, S. G., Cooper, R., & Boninger, M. L. (2005). Effect of a pushrim-activated power-assist wheelchair on the functional capabilities of persons with tetraplegia. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(3), 380–386. <https://doi.org/10.1016/J.APMR.2004.05.017>
- American Heritage Dictionary. (2005). Motor - American Heritage Science Dictionary . Retrieved October 29, 2019, from <https://ahdictionary.com/word/search.html?q=motor>
- Apple (CO). (2018). Baterías - ¿Por qué iones de litio? Retrieved October 3, 2018, from <https://www.apple.com/co/batteries/why-lithium-ion/>
- Autosolar Energy Solutions SLU. (2019). Batería GEL 12V 115Ah Ultracell UCG-115-12 | al Mejor Precio.
- Batería de Gel - EcuRed. (n.d.).
- Batería Solar. (2017). Baterías AGM 【QUÉ SON, VENTAJAS, USOS Y CARACTERÍSTICAS】.
- Biobike. (2019). Gretel NANO Ocasión (52 km) con GARANTÍA. Bicicletas Eléctricas BIOBIKE.
- BIOSMED Medical Store. (2018). Silla de Ruedas Manual con Frenos – BIOSMED Medical Store.
- BIOWEB. (2019). Baterías de Ácido de Plomo Sellada de 6V 12Ah - BIOWEB® Colombia.
- Bloswick, D. S., Clark, J. R., Gallegos, M., Horne, B. J., Kearl, A. M., & Osawa, R. (2012). *Patent No. US8087684B2*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US8087684>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



- Boninger, M. L., Koontz, A. M., Sisto, S. A., Dyson-Hudson, T. A., Chang, M., Price, R., & Cooper, R. A. (2005a). Pushrim biomechanics and injury prevention in spinal cord injury: recommendations based on CULP-SCI investigations. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42(3 Suppl 1), 9–19. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16195959>
- Boninger, M. L., Koontz, A. M., Sisto, S. A., Dyson-Hudson, T. A., Chang, M., Price, R., & Cooper, R. A. (2005b). Pushrim biomechanics and injury prevention in spinal cord injury: Recommendations based on CULP-SCI investigations. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42(3sup1), 9. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2004.08.0103>
- Borg, J., Östergren, P.-O., Larsson, S., Rahman, A. A., Bari, N., & Khan, A. N. (2012). Assistive technology use is associated with reduced capability poverty: a cross-sectional study in Bangladesh. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 7(2), 112–121. <https://doi.org/10.3109/17483107.2011.602173>
- Bray, N., Yeo, S. T., Noyes, J., Harris, N., & Edwards, R. T. (2016). Prioritising wheelchair services for children: a pilot discrete choice experiment to understand how child wheelchair users and their parents prioritise different attributes of wheelchair services. *Pilot and Feasibility Studies*, 2(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s40814-016-0074-y>
- Briceño, N. (2016). Controlar motores de corriente continua con Puente H. Retrieved October 28, 2019, from <http://arteymedios.org/tutoriales/item/76-controlar-motores-de-corriente-continua-con-puente-h>
- Bricogee. (2019). Motor paso a paso 9 Kg/cm (125 oz/in) Sparkfun ROB-13656 | BricoGeek.com.
- Broadhead, D. G., & Hobson, B. M. (1998). *Power assist device for a wheelchair*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US5222567A/en>
- Celera Motion. (2019). Codificadores absolutos y codificadores incrementales. Retrieved October 27, 2019, from <https://www.celeramotion.com/zettlex/es/asistencia/documentacion-tecnica/codificadores-absolutos-y-codificadores-incrementales/>
- Chair Institute. (2018). Different Types of Wheelchairs Available. Retrieved October 3, 2018, from <https://chairinstitute.com/types-of-wheelchairs/>
- Clarios. (2019). Tecnología de baterías húmedas de VARTA®: no requiere mantenimiento alguno. Vea todas las ventajas.
- CLR. (2019). Tipos de encoders y aplicaciones en motores. Retrieved October 27, 2019, from <https://clr.es/blog/es/tipos-de-encoders-aplicaciones-motores/>
- Curtis, K. A., Roach, K. E., Brooks Applegate, E., Amar, T., Benbow, C. S., Genecco, T. D., & Gualano, J. (1995). Development of the Wheelchair User's Shoulder Pain Index (WUSPI). *Spinal Cord*, 33(5), 290–293. <https://doi.org/10.1038/sc.1995.65>

- Dallmeijer, A., van der Woude, L., Janssen, T., & Veeger, D. (2001). Alternative Modes of Manual Wheelchair Ambulation: An Overview. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 80(10), 765–777. Retrieved from [https://journals.lww.com/ajpmr/Abstract/2001/10000/Alternative\\_Modes\\_of\\_Manual\\_Wheelchair\\_Ambulation\\_.12.aspx](https://journals.lww.com/ajpmr/Abstract/2001/10000/Alternative_Modes_of_Manual_Wheelchair_Ambulation_.12.aspx)
- DiGiovine, M. M., Cooper, R. A., Boninger, M. L., Lawrence, B. M., VanSickle, D. P., & Rentschler, A. J. (2000). User assessment of manual wheelchair ride comfort and ergonomics. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81(4), 490–494. <https://doi.org/10.1053/mr.2000.3845>
- Ding, D., & Cooper, R. A. (2005). Electric powered wheelchairs. *IEEE Control Systems*, 25(2), 22–34. <https://doi.org/10.1109/MCS.2005.1411382>
- Duarte, O. (2002). *Análisis de sistemas dinámicos lineales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Edberg, A.-K., & Persson, D. (2014). Review of Disability Studies: An International Journal. In *Review of Disability Studies: An International Journal* (Vol. 7). Retrieved from <http://www.rdsjournal.org/index.php/journal/article/view/133>
- Electromovilidad. (2018). Tipos de motores eléctricos. Retrieved October 3, 2018, from <http://electromovilidad.net/tipos-de-motores-electricos/>
- Electrónica Insurgentes Mazatlán. (2019). Módulo L293N Driver Puente H - Electrónica Insurgentes Mazatlán.
- Enriquez, G. (2004). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. Retrieved from [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=P62ebMavSIIC&oi=fnd&pg=PA2&dq=motores&ots=HxXLNvagbD&sig=thjy4L4W1aEU31SOL1UkfOsxXps&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=P62ebMavSIIC&oi=fnd&pg=PA2&dq=motores&ots=HxXLNvagbD&sig=thjy4L4W1aEU31SOL1UkfOsxXps&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Evans, S., Frank, A. O., Neophytou, C., & de Souza, L. (2007). Older adults' use of, and satisfaction with, electric powered indoor/outdoor wheelchairs. *Age and Ageing*, 36(4), 431–435. <https://doi.org/10.1093/ageing/afm034>
- Fernández, S. B. (2011). *Sensores para medir desplazamiento*.
- Finley, M. A., & Rodgers, M. M. (2014). Prevalence and identification of shoulder pathology in athletic and nonathletic wheelchair users with shoulder pain: A pilot study. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 41(3B), 395–402. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2003.02.0022>
- García, A. (2016). ¿Qué es y cómo funciona un servomotor? | Panama Hitek.
- García, V. (2014). EL Puente-H (H-Bridge). – Electrónica Práctica Aplicada.
- GlockCNC. (2019). Brushless Vs. Brushed Motors . Retrieved October 28, 2019, from <https://glockcnc.com/diy-cnc/brushless-vs-brushed-motors-for-taig-sherline/>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- GrabCAD Community. (2019). Popular models | 3D CAD Model Collection . Retrieved November 6, 2019, from <https://grabcad.com/library>
- Hamayer, K. (2001). Electrical Machines 1. Retrieved October 29, 2019, from [https://web.archive.org/web/20130210003139/http://materialy.itc.pw.edu.pl/zpnis/elect ric\\_machines\\_/ForStudents/Script\\_EMIHanneberger.pdf](https://web.archive.org/web/20130210003139/http://materialy.itc.pw.edu.pl/zpnis/elect ric_machines_/ForStudents/Script_EMIHanneberger.pdf)
- Home Care Technology. (2017). Silla de Ruedas Motorizada Estándar en Aluminio y Batería de Litio. Retrieved September 20, 2019, from <http://www.hctortopedicos.com/producto/silla-de-ruedas-motorizada-estandar-en-aluminio-y-bateria-de-litio/>
- Hospital de Torrevieja. (2018). *Uso y recomendaciones sobre silla de ruedas*. Retrieved from <http://www.torrevieja-salud.com/wp-content/uploads/2018/03/EDUCA-Silla-de-ruedas.pdf>
- Hughes, A., & Drury, B. (2013). *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. Newnes.
- Húsūsū. (2001). *Safe wheelchair*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/CN1143666C/en?q=wheelchair+energy+generator>
- i3D. (2019). i3D Fábrica Digital. Retrieved November 7, 2019, from <http://www.i3d.com.co/>
- Ideas 3D. (2019). Servicio De Impresión 3D - Ideas 3D . Retrieved November 7, 2019, from <https://ideas3d.co/>
- IMSA. (2016). RUEDA 8-NF-RCIR/BT-5/8-PL-NE-GZ-RTOR-CEN. Retrieved November 7, 2019, from <https://imsa.co/wp-content/uploads/2014/10/7094040-RUEDA-8-NF-RCIR-BT-5-8-PL-NE-GZ-RTOR-CEN.pdf>
- iPower Electronics. (2019). Botones Interruptores Mini Rocker Switch . Retrieved October 23, 2019, from <http://ipowerelectronics.com/botones-interruptores/122-mini-rocker-switch-onoff.html>
- Isidor Buchmann. (2019). Lead-acid Rechargeable Battery Information - Battery University.
- Jordan, R. W., Sloan, R., & Saithna, A. (2018). Should we avoid shoulder surgery in wheelchair users? A systematic review of outcomes and complications. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. <https://doi.org/10.1016/J.OTSR.2018.03.011>
- Karman Healthcare, I. (2019). Power Wheelchair Batteries: Understanding How the Battery Works.
- Karube, Y. (1978). *Brushless DC motor*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US4130769A/en>
- Koontz, A. M., Cooper, R. A., Boninger, M. L., Yang, Y., Impink, B. G., & V van der Woude, L. H. (2005). A kinetic analysis of manual wheelchair propulsion during start-up on

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- select indoor and outdoor surfaces. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 42(4). <https://doi.org/10.1682/JRRD.2004.08.0106>
- Kylstra, B., Jauvtis, N. I., Cook, T. M., Huff, J. W., & Kerrel, S. (2010). *Patent No. US7837210B2*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US7837210>
- Landau, I., & Zito, G. (2006). *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*.
- Langhoej. (2012). NuDrive Air. Retrieved October 3, 2018, from <http://www.nu-drive.com/>
- Lawson, B. (2005). Brushless DC and Reluctance Motors. Retrieved October 28, 2019, from <https://www.mpoweruk.com/motorsbrushless.htm#top>
- Learnchannel. (n.d.). Funcionamiento resolver - Learnchannel-TV.com.
- Liú tiānpíng. (2014). *Self-charging healthcare wheelchair*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/CN105496666A/en?q=wheelchair+energy+generator>
- Llamas, L. (2018). Motores paso a paso con Arduino y driver A4988 o DRV8825.
- Los Pinos. (2019a). Silla de Ruedas Acero Ultra Ligero. Retrieved September 16, 2019, from <https://lospinos-sa.com/producto/silla-de-ruedas-acero-ultra-ligero/>
- Los Pinos. (2019b). Silla de Ruedas Eléctrica 110A. Retrieved September 20, 2019, from <https://lospinos-sa.com/producto/silla-de-ruedas-electrica-110a/>
- Los Pinos. (2019c). Silla de Ruedas Estándar en Aluminio. Retrieved September 16, 2019, from <https://lospinos-sa.com/producto/silla-de-ruedas-estandar-en-aluminio/>
- Max Mobility. (2018). SmartDrive® MX2+PushTracker™. Retrieved October 3, 2018, from <http://www.max-mobility.com/smartdrive/#mx2pluspushtracker>
- MAX mobility. (2016). (27) MAX Mobility - SmartDrive MX2 Axle Clamp for Rigid Wheelchairs - YouTube.
- Maxon Group. (2019). Precision drive systems by maxon. Retrieved November 5, 2019, from <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/index>
- maxon motor ag. (2019). Brushless DC Motors by maxon motor.
- MercadoLibre. (2019). Bemonoc Reversible Electric High Torque Dc 24v Double Right. Retrieved October 26, 2019, from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-515098189-bemonoc-reversible-electric-high-torque-dc-24v-double-right-\\_JM?quantity=1#position=51&type=item&tracking\\_id=895939c9-7882-438a-88d6-a06bd37ad401](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-515098189-bemonoc-reversible-electric-high-torque-dc-24v-double-right-_JM?quantity=1#position=51&type=item&tracking_id=895939c9-7882-438a-88d6-a06bd37ad401)
- Meyers, A. R., Anderson, J. J., Miller, D. R., Shipp, K., & Hoenig, H. (2002). Barriers, facilitators, and access for wheelchair users: substantive and methodologic lessons

- from a pilot study of environmental effects. *Social Science & Medicine* (1982), 55(8), 1435–1446. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12231020>
- Morales, M., & Guzmán, A. (2014). Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustibles. Retrieved October 29, 2019, from <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>
- National Instruments. (2019). myRIO - Dispositivos Embebido para Estudiantes. Retrieved October 14, 2019, from <https://www.ni.com/es-co/shop/select/myrio-student-embedded-device>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Retrieved from [www.FreeLibros.org](http://www.FreeLibros.org)
- OMS. (2016). *Lista de ayudas técnicas prioritarias*. Retrieved from [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/207697/WHO\\_EMP\\_PHI\\_2016.01\\_spa.pdf?sequence=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/207697/WHO_EMP_PHI_2016.01_spa.pdf?sequence=1)
- Ortopedia Viva. (2017). Silla de ruedas eléctrica Singapur. Retrieved October 13, 2019, from <https://ortopediaactiva.com/sillas-ruedas-electricas/350-513-singapur.html>
- PCE Deutschland GmbH. (2019). Tacómetro de panel PCE-DTP 200 | PCE Instruments.
- Pololu. (2019). 100:1 Metal Gearmotor 37Dx73L mm with 64 CPR Encoder. Retrieved October 14, 2019, from <https://www.pololu.com/product/2826>
- Provail. (2016a). How do Magic Wheels work? Retrieved September 30, 2018, from magicwheels.com website: <https://www.magicwheels.com/how-do-they-work>
- Provail. (2016b). Magic Wheels. Retrieved September 30, 2018, from magicwheels.com website: <https://www.magicwheels.com/>
- Provail. (2016c). Magic Wheels - Compatibility. Retrieved October 1, 2018, from <https://www.magicwheels.com/compatibility>
- PushMobility. (2017). (27) SmartDrive MX2+. How does it work explained. - YouTube.
- Ragnarsson, K. (1990). Clinical perspectives on wheelchair selection--Prescription considerations and a comparison of conventional and lightweight wheelchairs. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. Retrieved from <https://search.proquest.com/openview/5fa15d6bea67bcd1720c214c6410048a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=48772>
- ReActiv. (2019). Silla de ruedas eléctrica de aluminio Xtreme Power de 19" Retrieved October 13, 2019, from ReActiv website: <https://reactiv.com.mx/producto/silla-de-ruedas-electrica-de-aluminio-xtreme-power-de-19-descansabrazos-desmontables-altura-ajustable-llantas-delanteras-de-9-y-traseras-de-14-neumaticas-antitippers-asiento-y-respaldo-acojinados-negro-mate-r218062>
- Rio Mobility. (2016). Rio Mobility | Firefly. Retrieved from <https://riomobility.com/firefly/?lang=es>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Ripat, J. D., & Woodgate, R. L. (2012). The role of assistive technology in self-perceived participation. *International Journal of Rehabilitation Research*, 35(2), 170–177. <https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e3283531806>
- Schneider. (2019). XD4PA223 - Controlador palanca tipo joystick, Ø22, 2 direcciones, 1NA por direcc. Retrieved November 7, 2019, from <https://www.se.com/co/es/product/XD4PA223/controlador-palanca-tipo-joystick%2C-%C2%A2-2-direcciones%2C-1na-por-direcci%C3%B3n/>
- Schweber, B. (2019). Don't Ignore the Humble Brushed DC Motor| Mouser.
- Sie, I. H., Waters, R. L., Adkins, R. H., & Gellman, H. (1992). Upper extremity pain in the postrehabilitation spinal cord injured patient. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(1), 44–48. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1729973>
- SIKO GmbH. (n.d.). WV58MR Codificador de valores absolutos | siko-global.com.
- Spemco Switches. (2019). Push Button Switches.
- Teyder. (2019). Motor para silla de ruedas, Ayudas técnicas y Accesorios | Teyder.
- TGA Mobility. (2019). Wheelchair Powerpacks - Wheelchair Accessories | TGA Mobility. Retrieved from <https://www.tgamobility.co.uk/range/powerpacks/wheelchair-powerpack-solo>
- The University of Alabama in Huntsville. (2005). *Types of Electric Motors*.
- TICBeat. (2016). Así funciona una batería externa de litio. Retrieved October 3, 2018, from <http://www.ticbeat.com/tecnologias/asi-funciona-una-bateria-externa-de-litio/>
- TME. (2017a). Estándar de lujo. Retrieved September 16, 2019, from Tiendas Médicas Especializadas S.A.S website: <https://tmecol.com/producto/estandar-de-lujo/>
- TME. (2017b). Estándar en Aluminio con marco rojo. Retrieved September 16, 2019, from Tiendas Médicas Especializadas S.A.S website: <https://tmecol.com/producto/estandar-en-aluminio-con-marco-rojo/>
- TME. (2017c). Semideportiva con rin en fibra de carbono. Retrieved September 16, 2019, from Tiendas Médicas Especializadas S.A.S website: <https://tmecol.com/producto/semideportiva-con-rin-en-fibra-de-carbono/>
- TME. (2017d). Semideportiva Importada en aluminio Ref. Active Sport. Retrieved September 16, 2019, from Tiendas Médicas Especializadas S.A.S website: <https://tmecol.com/producto/semideportiva-importada-en-aluminio/>
- TME. (2017e). Silla de Ruedas Eléctrica, Ref: TME012. Retrieved September 20, 2019, from <https://tmecol.com/producto/silla-de-ruedas-electrica-ref-elw012/>
- TME. (2017f). Silla de ruedas eléctrica Ref. TME-123. Retrieved September 20, 2019, from



<https://tmecol.com/producto/silla-de-ruedas-electrica-ref-fs-123/>

TME. (2017g). Silla de Ruedas Eléctrica Ref. TME-125. Retrieved September 20, 2019, from <https://tmecol.com/producto/silla-de-ruedas-electrica-ref-fs-125/>

TME. (2017h). Silla de Ruedas Eléctrica Ref. TME003. Retrieved September 20, 2019, from <https://tmecol.com/producto/silla-de-ruedas-electrica-ref-elw003/>

TME. (2017i). Silla estándar plegable. Retrieved September 16, 2019, from Tiendas Médicas Especializadas S.A.S website: <https://tmecol.com/producto/silla-de-ruedas-estandar-plegable-pintada-negra/>

Tolerico, M. L., Ding, D., Cooper, R. A., Spaeth, D. M., Fitzgerald, S. G., Cooper, R., ... Boninger, M. L. (2007). *Assessing mobility characteristics and activity levels of manual wheelchair users*. 44(4), 561–572. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2006.02.0017>

Toro, M. L., Eke, C., & Pearlman, J. (2015). The impact of the World Health Organization 8-steps in wheelchair service provision in wheelchair users in a less resourced setting: a cohort study in Indonesia. *BMC Health Services Research*, 16(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s12913-016-1268-y>

Turotest Medidores Ltda. (n.d.). Tacómetro analógico - Turotest.

tutiendaenergetica. (n.d.). Bateria ion-Litio para Patinete Eléctrico.

Universo 3D. (2019). Empresa de Impresión 3d Medellin. Retrieved November 7, 2019, from <http://www.u3d.com.co/>

Van der Woude, L. H. V., de Groot, S., & Janssen, T. W. J. (2006). Manual wheelchairs: research and innovation in sports and daily life. *Science & Sports*, 21(4), 226–235. <https://doi.org/10.1016/J.SCISPO.2006.06.006>

WHO, ISPO, & USAID. (2008). *Guidelines on the provision of manual wheelchairs in less resourced settings*. Retrieved from [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43960/9789241547482\\_eng.pdf?sequence=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43960/9789241547482_eng.pdf?sequence=1)

## ANEXO 1. ENCUESTA – SILLA DE RUEDAS

Esta encuesta es parte de un trabajo de grado de un estudiante de la Universidad EIA sobre la propulsión de sillas de ruedas manuales.

Usa el campo "otros" para escribir algún comentario que tengas sobre la pregunta o tu respuesta.

### Personal

1. Eres...
  - a. Un usuario de silla de ruedas manual
  - b. Un usuario de silla de ruedas eléctrica
  - c. Un experto en silla de ruedas
  - d. Una persona con conocimiento sobre rehabilitación y sillas de ruedas
  - e. Otra...

### Sillas de ruedas eléctricas

Las preguntas a continuación se refieren a las sillas de ruedas eléctricas convencionales, sin adaptaciones neurológicas, y para pacientes con buen control postural.

2. ¿Qué rango de velocidad te parece apropiado para una silla de ruedas eléctrica?
  - a. 1 km/h a 4km/h
  - b. 1 km/h a 6km/h
  - c. 1 km/h a 10km/h
  - d. Otra...
3. ¿Cuál crees que debería ser el máximo peso soportado por una silla de ruedas eléctrica?
  - a. 80 kg
  - b. 90 kg
  - c. 100 kg
  - d. 110 kg
  - e. Otra...
4. ¿Cuál crees que debería ser la máxima inclinación soportada por una silla de ruedas eléctrica?
  - a. 8° (14%)
  - b. 10° (17.6%)
  - c. 12° (21.2%)
  - d. Otra...

### Sistemas de asistencia a la propulsión

Las preguntas a continuación se refieren a sistemas externos que pueden ser acoplados a una silla de ruedas manual para asistir en su propulsión. Normalmente cuentan con un motor, una batería, un sistema de control y un mando para el usuario.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



5. ¿Qué peso propio \*máximo\* te parece adecuado para un sistema de propulsión?
- 20 kg
  - 15 kg
  - 10 kg
  - 5 kg
  - Otra...
6. ¿Qué rango de precios te parece adecuado para un sistema de propulsión?  
Los rangos se diseñaron en USD, y el cambio a COP es una aproximación.
- 100 – 200 USD (340.000 – 680.000 COP)
  - 200 – 300 USD (680.000 – 1.000.000 COP)
  - 300 – 400 USD (1.000.000 – 1.350.000 COP)
  - 400 – 500 USD (1.350.000 – 1.700.000 COP)
  - Otra...
7. ¿Qué duración esperarías de la batería de un sistema de propulsión en uso continuo?  
Atención: esta es la duración total aproximada en uso continuo del dispositivo.
- 3 horas
  - 6 horas
  - 8 horas
  - 10 horas
  - Otra...
8. ¿Qué independencia esperarías de la batería de un sistema de propulsión en términos de distancia?
- 10 km
  - 15 km
  - 20 km
  - 25 km
  - Otra...
9. ¿Cuál crees que sea la interfaz (mando del usuario) más adecuada para el manejo de la silla de ruedas acoplada a un sistema de propulsión?  
Atención: como la silla manual ya está acoplada a un sistema de propulsión, puedes responder a esta pregunta como si se tratase de una silla eléctrica.
- Joystick
  - App móvil (pantalla táctil)
  - Switch o botones accionados mecánicamente
  - Perilla
  - Otra...
10. ¿Qué rango de tiempo te parece adecuado para la instalación del sistema de propulsión en una silla de ruedas?  
Atención: este es el tiempo que el usuario se demoraría en acoplar el sistema de propulsión a la silla de ruedas manual.

- a. 1-5 minutos
- b. 5-10 minutos
- c. 10-15 minutos
- d. Otra...

11. ¿Es importante para ti (como usuario o experto) que las partes de un sistema de propulsión estén disponibles en Colombia?

- a. Sí
- b. No
- c. Otra...

## ANEXO 2. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

<p><b>1.1. Acoplar el motor</b>  <b>5.1. Desacoplar el motor</b></p>	
	<p><b>Gancho a presión</b>          Un gancho (anaranjado en el diagrama) que se encaja a presión en el eje de las ruedas traseras de la SRM.</p> <p>Es un concepto sencillo, un acople rápido e intuitivo. Sólo se necesitaría un motor y un sistema de acople por SRM.</p> <p>La persona que realiza el acople debe tener suficiente fuerza para empujar el gancho contra el eje. Puede requerir un elemento intermedio (como caucho) entre el gancho y el eje para evitar ruido o vibración excesiva.</p>
 <p>(Biobike, 2019)</p>	<p><b>Motor hub - Permanente</b>          Un motor hub, motor de cubo de rueda o motor de rueda, está contenido en un cilindro que se acopla directamente al eje de la rueda.</p> <p>Se necesitarían dos sistemas por SRM, uno por rueda trasera. Su instalación requiere de fuerza y motricidad fina.</p> <p>El ejemplo de la figura es la bicicleta Gretel Nano con motor hub en la rueda trasera. Su instalación se realiza una sola vez, pues el sistema permanece acoplado (Biobike, 2019).</p>
	<p><b>Motor hub - Sistema removible</b>          Sistema muy similar al anterior, con un motor hub. También se requerirían dos sistemas por SRM, y su instalación inicial requiere de fuerza y motricidad fina.</p> <p>Sin embargo, aquí el sistema rueda-motor se podría acoplar y desacoplar fácilmente de la SRM, permitiendo un diseño más complejo, mientras se mantiene un funcionamiento sencillo para el usuario.</p> <p>En la figura superior, se observa este concepto SAP para SRM llamado E-Fix. Las ruedas convencionales</p>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



(Alber, 2019b)

se remplazan por las ruedas motorizadas E-Fix, equipadas con un motor hub (Alber, 2019b).

La figura inferior muestra cómo las ruedas motorizadas se desacoplan de la SRM con sólo presionar un botón en el centro de la rueda.



(MAX mobility, 2016)

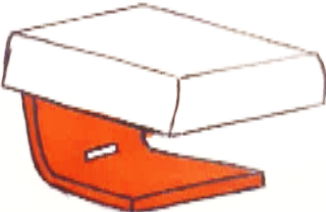

### **Abrazadera**

Dos semicírculos unidos por tornillos que se ajustan alrededor de un cilindro de caucho por donde pasa un eje de la SRM.

Este sistema es durable y seguro. Se necesitaría un sólo motor y una sola abrazadera por SRM.

Su instalación requiere de motricidad fina y fuerza. Sin embargo, podría usarse como adaptador. Así, la abrazadera se instalaría de forma permanente a un eje de la SRM, y luego el motor se acoplaría fácilmente al adaptador al momento de usar el sistema.

Las imágenes presentan la abrazadera del SAP SmartDrive MX2. En la superior, se observa el espacio destinado al eje de la SRM, y en la inferior, el adaptador T donde se acopla el motor (MAX mobility, 2016).

<b>1.2. Acoplar la batería</b> <b>5.2. Desacoplar la batería</b>	
	<p><b>Bolsillo de plástico rígido</b></p> <p>Sistema en L rígido ubicado debajo del asiento de la SRM. La batería se introduciría por la cara frontal de la SRM, para que una persona sentada en ella lo pueda hacer fácilmente.</p> <p>El cable de la batería podría fijarse al soporte, para que, al ubicar la batería en su lugar, esta quede conectada automáticamente. Para lograr esto, se podría usar una conexión magnética o a presión.</p> <p>En la figura se muestra un ejemplo de este sistema donde el rectángulo blanco representa una ubicación tentativa para la conexión.</p> <p>Por ser rígido, podría generar ruido por choques entre la batería y el soporte ante la vibración de la SRM. Esto se podría solucionar ubicando la batería en bases de caucho o silicona sobre la base del soporte.</p>
	<p><b>Bolsillo de tela bajo el asiento</b></p> <p>El peso de este soporte depende de la tela, pero en general, se puede considerar más liviano que otras opciones.</p> <p>Por su naturaleza flexible, no produciría ruido significativo ante la vibración de la SRM. Además, permitiría introducir baterías de varios tamaños fácilmente.</p> <p>Su conexión eléctrica al resto del sistema tendría que hacerse en un paso extra. Su limpieza y mantenimiento puede volverse complicada. Si no se diseña correctamente, la batería podría sobrecalentarse, por no tener un flujo de aire que sirva de refrigerante.</p>



(Alber, 2019b)

### **Combinación soporte rígido y flexible**

La idea de este sistema es combinar la funcionalidad y seguridad del soporte rígido y con la versatilidad del flexible.

Al tener un componente flexible, se disminuye el ruido por vibración, y se aumenta su adaptabilidad a SRM de diferentes tamaños y configuraciones.

Su componente rígido permite una mejor fijación de la batería en el soporte y facilita la configuración de una conexión automática magnética o a presión.

Para diseñar un soporte rígido-flexible, sin embargo, aún es importante tener un aproximado confiable de las dimensiones de la batería.

Las imágenes muestran el soporte y la batería del SAP E-Fix. Cuatro cuerdas sostienen una carcasa donde encaja la batería a presión, y queda conectada. Para retirar la batería, se acciona una palanca (Alber, 2019b). Este sistema usa una batería personalizada que claramente no sería el caso en este trabajo, pero el concepto podría ser aplicable.



(PushMobility, 2017)

### **Sistema conjunto motor - batería (fusionados)**

La batería y el motor están contenidos en un sólo dispositivo, por lo que las subfunciones 1.1. y 1.2. se fusionarían. El acople depende entonces de un sólo sistema, cualquiera de los expuestos anteriormente.

Tener los dos componentes de mayor masa del SAP en el mismo dispositivo, podría aumentar demasiado la masa de este. No obstante, tener una sola pieza que acoplar también podría resultar más sencillo.

En la figura, se muestra el SAP SmartDrive MX2, que se acopla al eje de las ruedas de la SRM con una abrazadera fija que sirve de adaptador al dispositivo (PushMobility, 2017).





(TGA Mobility, 2019)



(Teyder, 2019)

### **Sistema conjunto motor - batería (independientes)**

Como en el caso anterior, el motor y la batería se acoplan juntos, pero aquí ambos son componentes individuales. El motor está situado entre las ruedas del “carrito”, mientras la batería está en el estuche que descansa en una estructura rígida.

Permitiría manipular los componentes por separado o como una sola pieza según necesidad, haciendo más fácil su mantenimiento y reparación. La desventaja es que su tiempo de instalación es un poco más largo.

Las dos primeras muestran, en orden, el Duo Power Pack y el Solo Power Pack de TGA Mobility que se diferencian en el número de ruedas (TGA Mobility, 2019).

La última, muestra el Power Pack Plus de Teyder (Teyder, 2019), con una estructura similar. Su eje telescópico (longitud ajustable) se inserta en dos pinzas laterales que se instalan de forma permanente en la estructura trasera de la SRM.

El SAP actúa entonces como un sólo objeto que puede ser retirado e instalado de la SRM con sólo accionar las palancas de las pinzas laterales.

### **1.3. Acoplar el mando**

### **5.3. Retirar el mando**



(Teyder, 2019)

### **Abrazadera permanente**


La base del mando tendría una abrazadera que se instala alrededor de uno de los tubos de la SRM. Su instalación requiere de herramientas y motricidad fina, y se debe realizar cada vez que se quiera montar/desmontar el sistema.



En la figura, se muestra el control de mando del Power Pack Plus de Teyder, pensado para ser controlado por un acompañante. Para sistemas controlados por el usuario, la abrazadera se podría ubicar en la estructura rígida bajo los descansabrazos (Teyder, 2019).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

 <p>(Alber, 2019b)</p>	<p><b>Eje en soporte con agujero</b></p> <p>Control de mando con eje que se introduce en el agujero de un soporte acoplado permanentemente a la estructura lateral de la SRM (como el descansabrazo).</p> <p>Esta configuración puede ser útil si el mando es un joystick, botones o una pantalla táctil. La conexión de cables podría ser a presión o magnética.</p> <p>En la figura, se muestra el mando del SAP E-Fix. El cable está unido permanentemente al mando y el otro extremo se conecta magnéticamente al resto del sistema electromecánico (Alber, 2019b).</p>
 <p>(Rio Mobility, 2016)</p>	<p><b>Sistema motor + batería + control de mando</b></p> <p>En esta configuración, el motor, la batería y el control de mando se fusionan como una sola pieza. Así, las funciones 1.1, 1.2, y 1.3 se unirían y sólo se debería realizar la instalación de una pieza.</p> <p>Este tipo de sistemas pueden resultar voluminosos y pesados, y su proceso de instalación o acople puede ser más complejo que el de pequeñas piezas individuales. En general, se requiere que se instalen adaptadores permanentes que permitan el acople del sistema a la SRM.</p> <p>En la figura, se observa el SAP o “bicicleta de mano” Firefly de Rio Mobility. Su instalación inicial es compleja, pero después de asegurar unas abrazaderas a los lados de la SRM y de adecuar el sistema a las medidas del usuario, se acopla y desacopla fácilmente por medio de dos pinzas que encajan en las abrazaderas (Rio Mobility, 2016).</p>
	<p><b>Sistema vestible</b></p> <p>Este sistema vestible o wearable es versátil pues no requiere herramientas, se ajusta al tamaño del usuario y puede resultar más fácil para este ajustar un objeto a su propio cuerpo que acoplarlo a la SRM.</p> <p>Un posible reto es el diseño de la comunicación entre el elemento vestible y el resto del sistema. Si se usan cables, estos podrían interferir gravemente en el movimiento del usuario, en especial si el elemento se viste en las manos o brazos. Si es inalámbrico, se</p>



 <p>(MAX mobility, 2016)</p>	<p>eliminan las dificultades del cableado, pero se debe garantizar una conexión estable y confiable.</p> <p>En la figura, se muestra el brazalete del SmartDrive MX2+. El brazalete recibe información del usuario gracias a pequeños golpes o “taps” de la mano donde viste el brazalete sobre cualquier superficie. Sus creadores lo diseñaron para que el usuario, que está manejando la SRM con sus brazos, pudiera activar la asistencia a la propulsión dando pequeños golpes en el aro de la rueda (MAX mobility, 2016).</p>
---	---

<p><b>2.1. Accionar el activador (activación)</b></p> <p><b>4.1. Accionar el activador (desactivación)</b></p>	
 <p>(Alber, 2019b)</p>  <p>Montaje con imágenes de: (BIOSMED Medical Store, 2018; Spemco Switches, 2019)</p>	<p><b>Botón de encendido</b></p> <p>Botón simple de encendido/apagado. Se presiona para activar el sistema electromecánico. Es viable con casi todas las configuraciones de batería – motor, y es sencillo, económico e intuitivo.</p> <p>Si el mando es un dispositivo independiente, como en el caso de E-Fix en la figura superior, este activador formaría parte de dicho dispositivo.</p> <p>Si, por el contrario, el control de la velocidad se realiza por otro medio que no requiere un dispositivo independiente tipo interfaz, este botón activador podría sujetarse a los tubos delanteros de la SRM, como se observa en la segunda imagen. Esto podría lograrse con abrazaderas o correas.</p> <p><b>Giro de la cobertura del motor hub</b></p> <p>Esta opción es sólo viable en si se trata de motores hub en cada rueda. Mediante un sistema de engranajes, se puede lograr que con un giro de la parte externa del sistema este se acople o desacople del eje de la rueda.</p>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

 <p>(Alber, 2019b)</p>	<p>Al tener el activador en la rueda, quedaría cerca de las manos del usuario que ya estaban allí para impulsarse y, además, no se tendría que añadir otro dispositivo.</p> <p>Un ejemplo es el SAP E-Fix, donde la cobertura blanca, que se muestra en la figura, se gira en un sentido para engranar el sistema y en el otro para el efecto contrario (Alber, 2019b).</p>
 <p>(iPower Electronics, 2019)</p>	<p><b>Switch o interruptor de palanca</b></p> <p>Similar al concepto del botón. Es viable con casi todas las configuraciones de batería-motor, y es sencillo, económico e intuitivo.</p> <p>Puede, al igual que el botón, formar parte del control de mando, o ubicarse en los tubos delanteros de la SRM como dispositivo independiente.</p>
 <p>(MAX mobility, 2016)</p>	<p><b>Sistema vestible</b></p> <p>Sistema descrito en las alternativas de solución de las subfunciones 1.3 y 5.3. En general, son brazaletes o relojes digitales, fáciles de entender, operar y poner.</p> <p>En el caso del brazalete del SmartDrive MX2+, para activar el motor y empezar el movimiento, el usuario debe dar dos pequeños golpes con la mano donde lo lleva puesto (MAX mobility, 2016).</p>

### 3.1. Leer señal del control de mando

 <p>(Alber, 2019b)</p>	<p><b>Joystick</b></p> <p>Joystick convencional, conformado por una palanca generalmente vertical, con movimiento libre sobre dos ejes. Un mayor desplazamiento de la palanca se traduce en una mayor intensidad de la señal, o en este caso, mayor velocidad.</p> <p>La imagen representa la unidad de control del sistema E-Fix, cuyo joystick controla velocidad y dirección (Alber, 2019b).</p>
---	---

 <p>Fuente: autor del trabajo.</p>	<p><b>Interfaz digital - Pantalla táctil</b></p> <p>La interfaz digital que podría programarse como una app para Smartphones o tablets, ya que muchos usuarios usan estos equipos.</p> <p>Requeriría de un sistema de acople, que podría ser adaptado a partir de un soporte comercial para estos dispositivos. La comunicación con el resto del sistema electromecánico sería inalámbrica.</p> <p>Con un modelo de 4 botones, como se muestra en la figura, el usuario primero seleccionaría el sentido del movimiento (adelante o atrás) con el primer par de botones. Luego, con el segundo par de botones, gradúa la velocidad de forma discreta.</p>
 <p>Fuente: autor del trabajo.</p>	<p><b>Botones</b></p> <p>Interfaz simple con dos botones, uno para aumentar la velocidad y otro para disminuirla.</p> <p>Para indicar el sentido del movimiento, es decir, si el usuario quiere avanzar o retroceder, se podría añadir un interruptor o switch.</p>
 <p>(Teyder, 2019)</p>	<p><b>Perilla</b></p> <p>Interfaz simple con una perilla aumentar o disminuir la velocidad. Para indicar el sentido del movimiento (avanzar o retroceder), se podría añadir un interruptor, y que la perilla vaya de 0 a máxima velocidad.</p> <p>También se podría hacer que la perilla vaya del máximo negativo al máximo positivo, con la velocidad cero en la posición neutra (perilla en el centro). Se giraría a la izquierda para retroceder, y a la derecha para avanzar.</p> <p>En la imagen, se observa el mando del Power Pack Plus de Teyder. Usa una llave como activador, un switch para el sentido del movimiento, una perilla indica la velocidad, y como extra tiene bocina (Teyder, 2019).</p>

### 3.2. Leer la velocidad del motor



(Turotest Medidores Ltda, n.d.)

#### Tacómetro analógico

Instrumento que permite conocer la velocidad de un motor, generalmente en RPM, midiendo la velocidad de rotación de un eje.

En el tacómetro analógico, la velocidad se indica al usuario con una aguja que se mueve por medio de un sistema de engranajes (Turotest Medidores Ltda, n.d.).



(PCE Deutschland GmbH, 2019)

#### Tacómetro digital

Al igual que el anterior, permite conocer la velocidad de un motor. Han reemplazado a los analógicos, no sólo por su pantalla, sino por su exactitud en las mediciones, ya que cuentan con un microprocesador.

Existen tacómetros de contacto, donde el sensor toca el eje en rotación, o sin contacto (u óptico), donde la medición se realiza por láser. Con la modalidad óptica el sensor no tiene que ubicarse justo al lado del motor, sino a distancias de hasta 5 metros, lo que le da flexibilidad al diseño (PCE Deutschland GmbH, 2019).



(SIKO GmbH, n.d.)

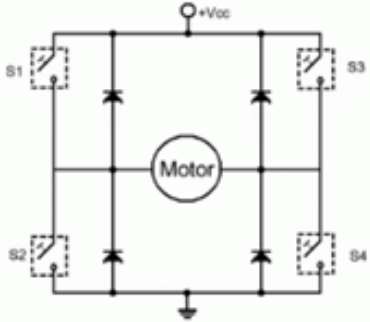
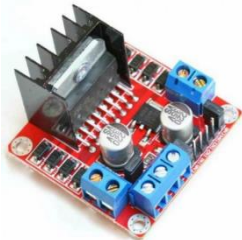
#### Encoder o codificador rotatorio

Transductor que lee la posición angular o movimiento de un eje, y la convierte en una salida digital.

El encoder absoluto indica la posición del eje, asignando para cada una un código particular e invariante, usando código binario o gray (ABM Industrial, 2012).



El encoder incremental o relativo, da información sobre el movimiento que a su vez se puede convertir en velocidad, posición y distancia recorrida por el eje. Pero como estos no conocen la posición inicial ni la dirección en la que rota el eje, se pueden necesitar sensores adicionales para cumplir este objetivo. Este tipo de encoder sólo indica la posición si tiene un punto de referencia desde el cuál medirla, en incrementos, lo que se considera un paso de calibración (Celera Motion, 2019; CLR, 2019).

 <p>(Learnchannel, n.d.)</p>	<p><b>Resolver</b></p> <p>Dispositivo conformado de un estator, una parte estacionaria, y un rotor, parte giratoria, como se observa en la figura.</p> <p>La información sobre la velocidad del motor se obtiene gracias a la interacción entre un campo magnético generado por el estator y la posición angular del rotor, que está unido al eje del motor (Fernández, 2011).</p> <p>Los resolvers podrían usarse en ciertas aplicaciones que emplean encoders. Al ser completamente analógicos, suelen tener mayor robustez mecánica y ser más resistentes a condiciones como la suciedad y vibraciones (Fernández, 2011).</p>
---	--

3.3. Activar o desactivar el motor - Driver motor	
 <p>(Garcia, 2014)</p>  <p>(Electrónica Insurgentes Mazatlán, 2019)</p>	<p><b>Puente H</b></p> <p>Es una configuración circuital que le permite a un motor DC girar en dos sentidos diferentes. Se compone de cuatro interruptores que pueden ser mecánicos o transistores.</p> <p>En términos generales, su funcionamiento se basa en abrir y cerrar los interruptores de dos en dos (S1-S4 y S2-S3 en la imagen) para invertir el sentido en el que fluye la corriente a través del motor, sin cambiar la configuración de la fuente (Briceño, 2016).</p>



 <p>(Llamas, 2018)</p>	<p><b>Drivers A4988 o DRV8825</b></p> <p>Son controladores que simplifican el manejo de motores paso a paso, regulando los altos voltajes, corrientes e incluso temperaturas que afectan el circuito. Funcionan con dos salidas digitales, una para el sentido de giro del motor y otra para la activación, además permiten realizar un aumento en la precisión nominal del motor (Llamas, 2018).</p> <p>Ambos tienen la misma función y un precio similar.</p>
---	---

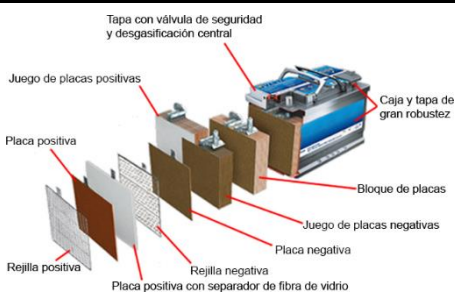
3.3. Activar o desactivar el motor - Fuente de energía	
 <p>(tutiendaenergetica, n.d.)</p>	<p><b>Batería de litio</b></p> <p>Batería electroquímica que almacena la energía usando como electrolito una sal de litio. Se compone de un cátodo, un ánodo y un electrolito entre ellos.</p> <p>Hay diferentes tipos de baterías dependiendo de su material catódico como el óxido de cobalto, de manganeso y fosfato de hierro; algunas de ellas son recargables. En general, son ligeras y tienen gran capacidad energética. Sin embargo, soportan un número limitado de cargas, son costosas y se sobrecalientan fácilmente (Apple (CO), 2018; TICBeat, 2016).</p>
 <p>(Autosolar Energy Solutions SLU, 2019)</p>	<p><b>Baterías de gel</b></p> <p>En este tipo de baterías el electrolito se encuentra gelificado, lo que presenta beneficios como: resistencia a golpes o vibraciones, versatilidad en su posicionamiento porque no se derraman, no necesitan mantenimiento, soportan altas temperaturas, mayor número de cargas y descargas.</p> <p>A pesar de tener grandes beneficios, son más costosas que la mayoría de los demás tipos de baterías y tienen alrededor del 10-20% menos capacidad que las baterías húmedas por ejemplo (Autosolar Energy Solutions SLU, 2019; "Batería de Gel - EcuRed," n.d.; Karman Healthcare, 2019).</p>



Húmedas (Clarios, 2019).



Selladas (BIOWEB, 2019).



(Batería Solar, 2017)

### Batería de ácido-plomo

El electrodo positivo es una placa de plomo recubierta con óxido de plomo y el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico.

En general son económicas, con alta capacidad y confiables. Sus características y aplicaciones particulares varían de acuerdo con los diferentes tipos, como las selladas y las húmedas.

#### Selladas (SLA, Sealed lead-acid battery):

Recomendadas para cargas pequeñas, lugares sin ventilación o de difícil acceso, no requieren mantenimiento (BIOWEB, 2019).

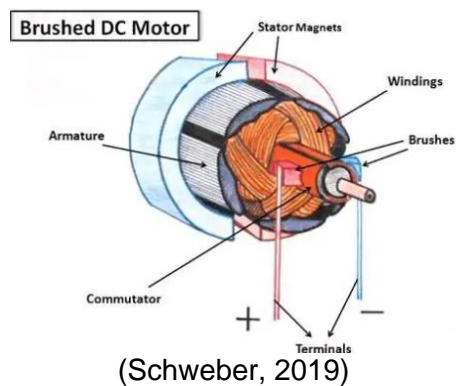
Húmedas: Muy comunes en vehículos convencionales, como baterías de arranque porque pueden suministrar unas intensidades de corriente alta (Clarios, 2019).

### Baterías AGM (Absorbed Glass Mat)

Tipo más moderno de las baterías selladas que utilizan una fibra de vidrio para separar el ácido y fijar el electrolito, mejorando su eficiencia y evitando derrames. Son comunes en medios de transporte.

Presentan alta capacidad por su baja resistencia interna, buen arranque en frío, larga vida útil y no necesitan mantenimiento. Sin embargo, por su tecnología innovadora pueden resultar costosas y son sensibles a sobrecargas (Batería Solar, 2017; Isidor Buchmann, 2019).

### 3.3. Activar o desactivar el motor - Motor



#### Motor DC con escobillas

Motor eléctrico que usa una fuente de alimentación de corriente directa para producir energía mecánica. Lo logra por medio de la interacción entre un campo magnético y la corriente eléctrica, que genera torque al alternar la polaridad de los imanes del rotor (parte giratoria). Su velocidad y torque dependen de la magnitud de la fuente de alimentación (Schweber, 2019).

Las escobillas son los contactos eléctricos que hacen contacto con los segmentos del conmutador (unido al rotor) mientras este gira. Como existe un contacto mecánico, las escobillas se desgastan y deben ser reemplazadas.

Suelen tener un precio menor a otras opciones, pero también pueden ser más ineficientes, producir mayor calor y requerir mantenimientos más frecuentes (GlockCNC, 2019).

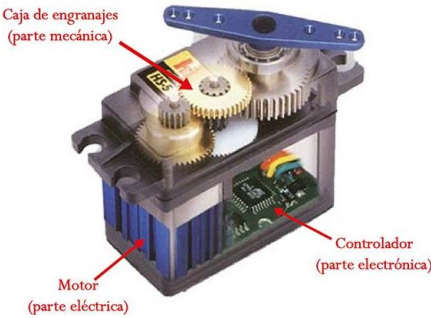



#### Motor DC sin escobillas

Su funcionamiento es muy similar al anterior, con la diferencia de que no tienen escobillas. Desde su desarrollo, han reemplazado a los motores DC con escobillas por varias razones, como que requieren menos mantenimiento, son más silenciosos, y generan menos calor (GlockCNC, 2019).

Además, suelen tener mayor potencia por unidad de peso, y mayor torque por amperio, en parte debido a que no hay pérdidas por la fricción de las escobillas, que suelen llamarse “brush drop” (Lawson, 2005).

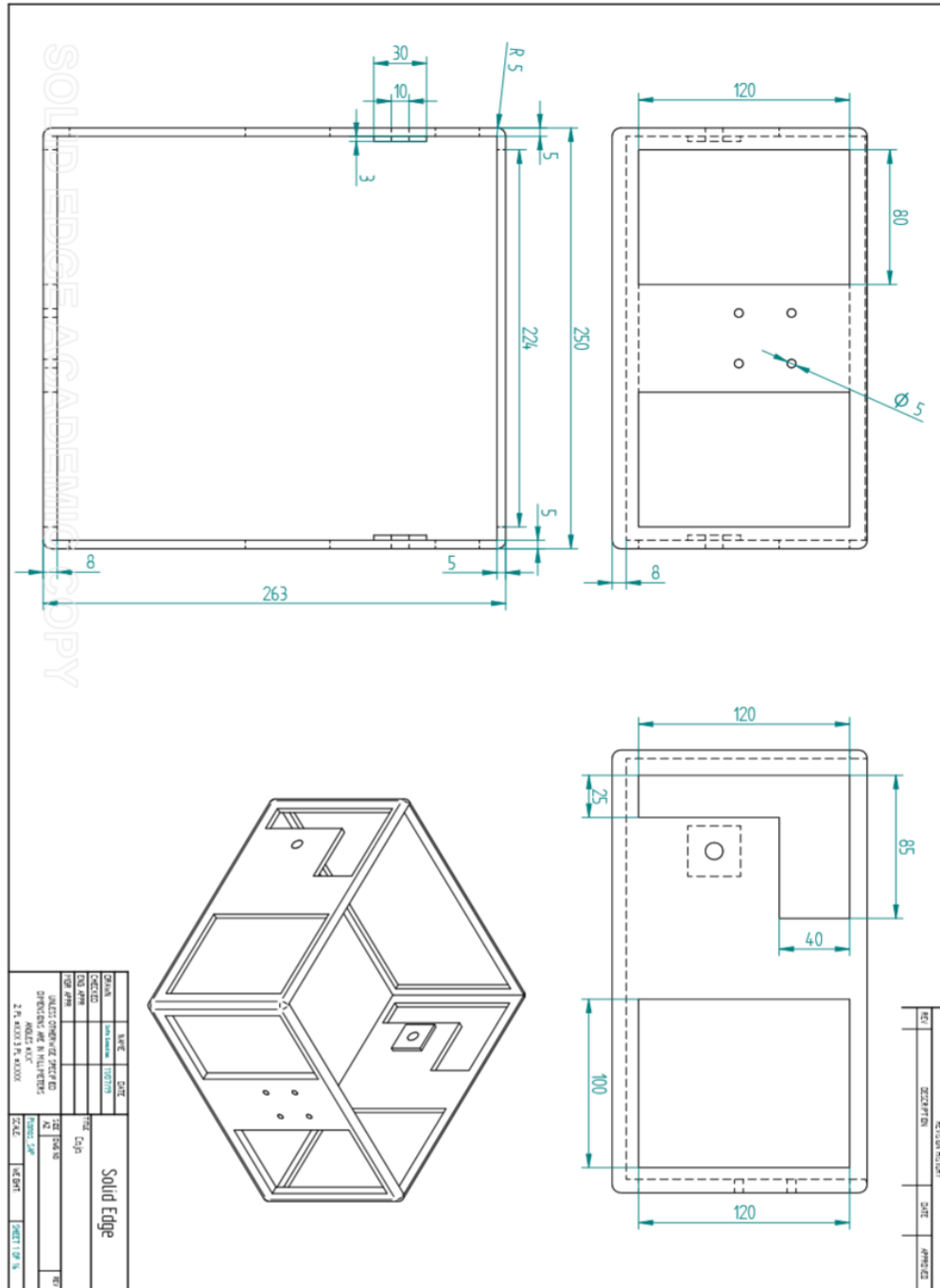


 <p>(García, 2016)</p>	<p><b>Servomotor</b></p> <p>Tipo especial de motor que tiene la capacidad de controlar la posición del eje en determinado momento, diseñado para moverse en una cantidad de grados fija.</p> <p>Está compuesto por elementos electromecánicos y electrónicos, cuyo motor interno es un motor DC con el eje acoplado a una caja de engranajes. Este sistema potencia el torque y fija una posición cuando se requiera.</p> <p>Especialmente útil cuando se necesita tener control del movimiento muy preciso, como en el caso de los robots (García, 2016).</p>
 <p>(Bricogee, 2019)</p>	<p><b>Motor paso a paso</b></p> <p>Convierte los impulsos eléctricos en desplazamiento angular discreto, permitiendo que el motor gire una determinada cantidad de grados dependiendo de las entradas de control.</p> <p>Se compone de un estator que contiene bobinas ferromagnéticas y un rotor que gira libremente. Hay tres tipos de motor paso a paso: de reductancia variable, de imán permanente e híbrido (Bricogee, 2019).</p> <p>Tiene buena precisión y replicabilidad de posicionamiento.</p>

### ANEXO 3. PLANOS DEL SAP

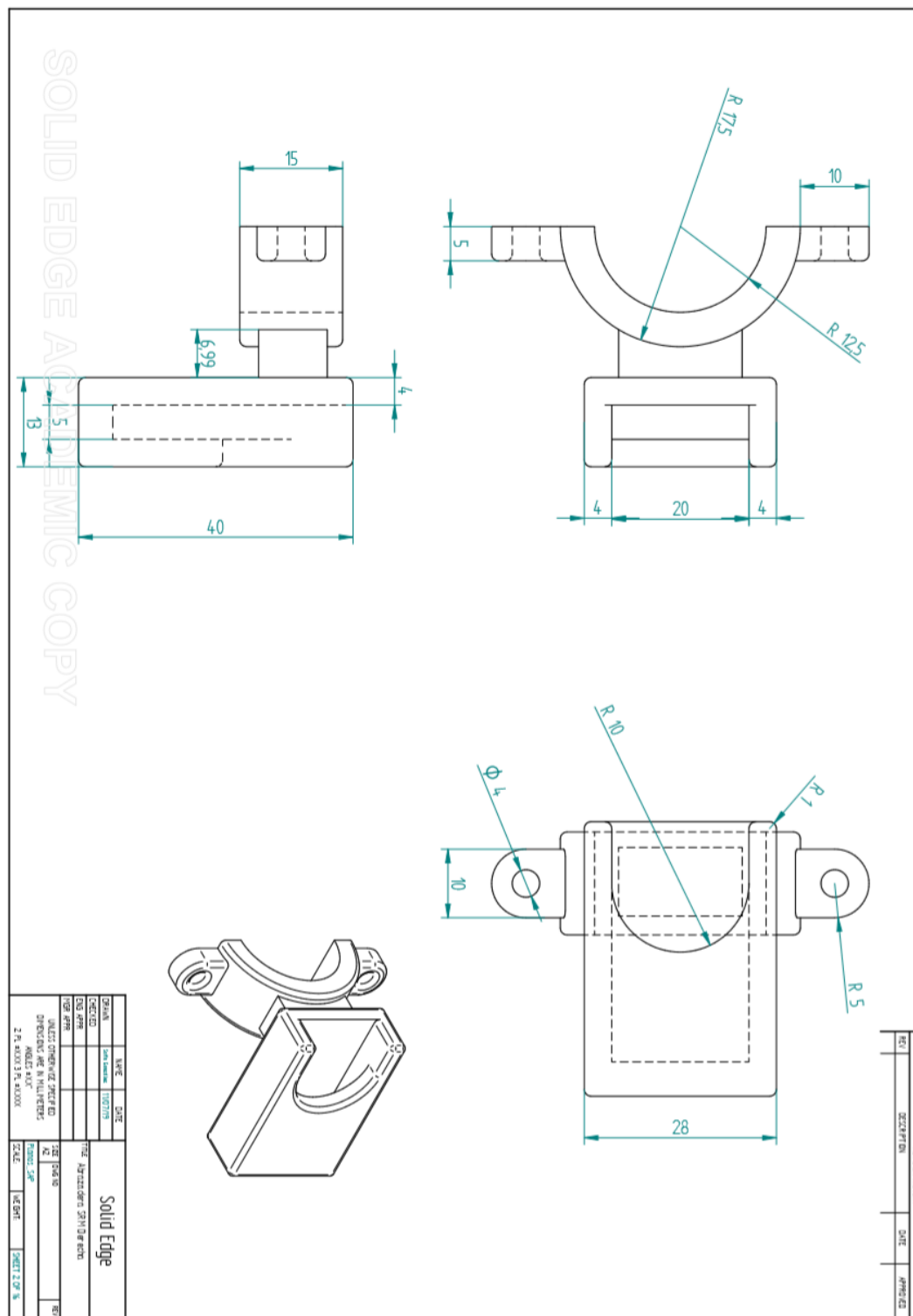
Los planos mostrados a continuación se realizaron en Solid Edge.

Estructura de la caja principal.



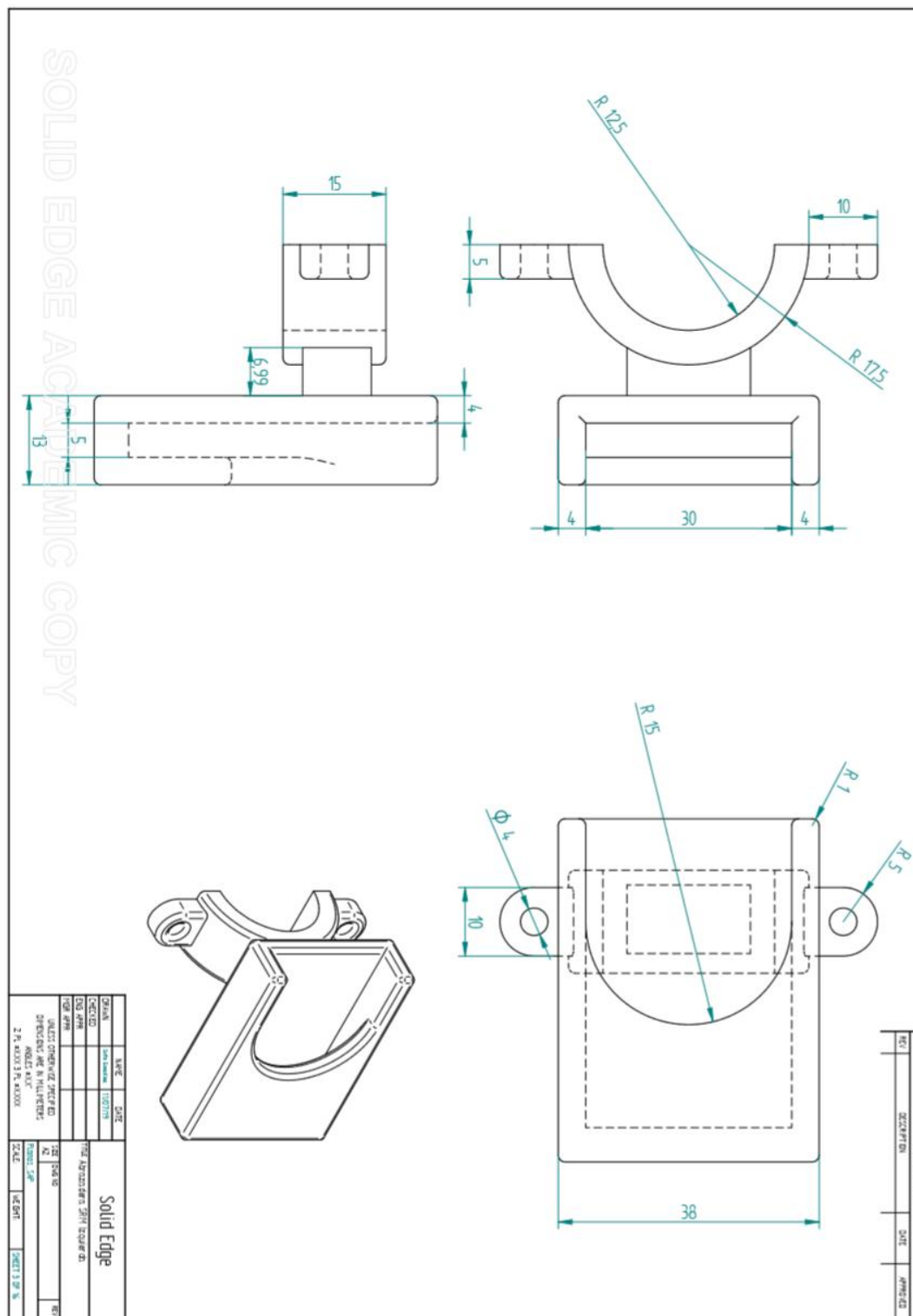
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Abrazadera SAP-SRM derecha.



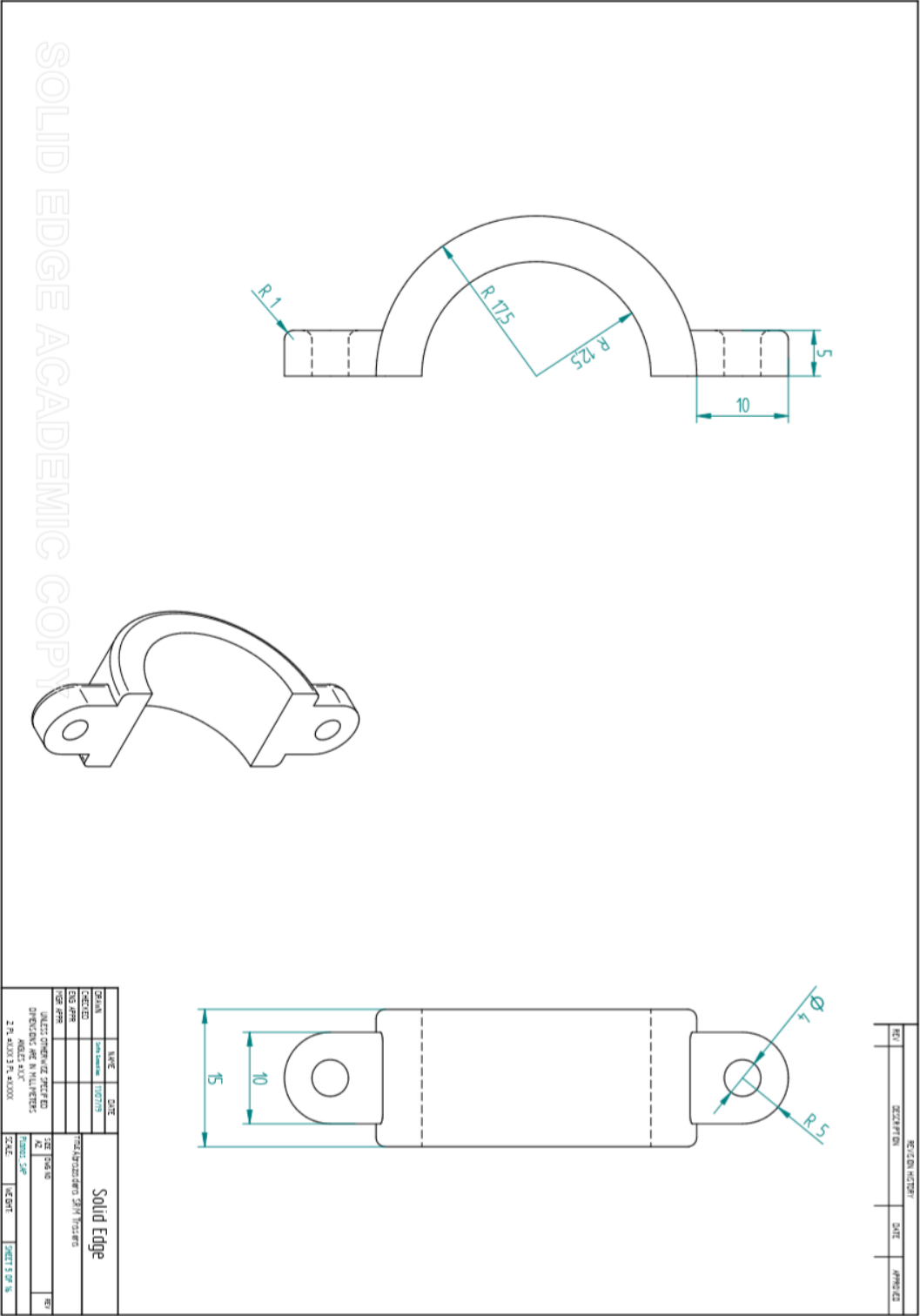
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Abrazadera SAP-SRM izquierda.



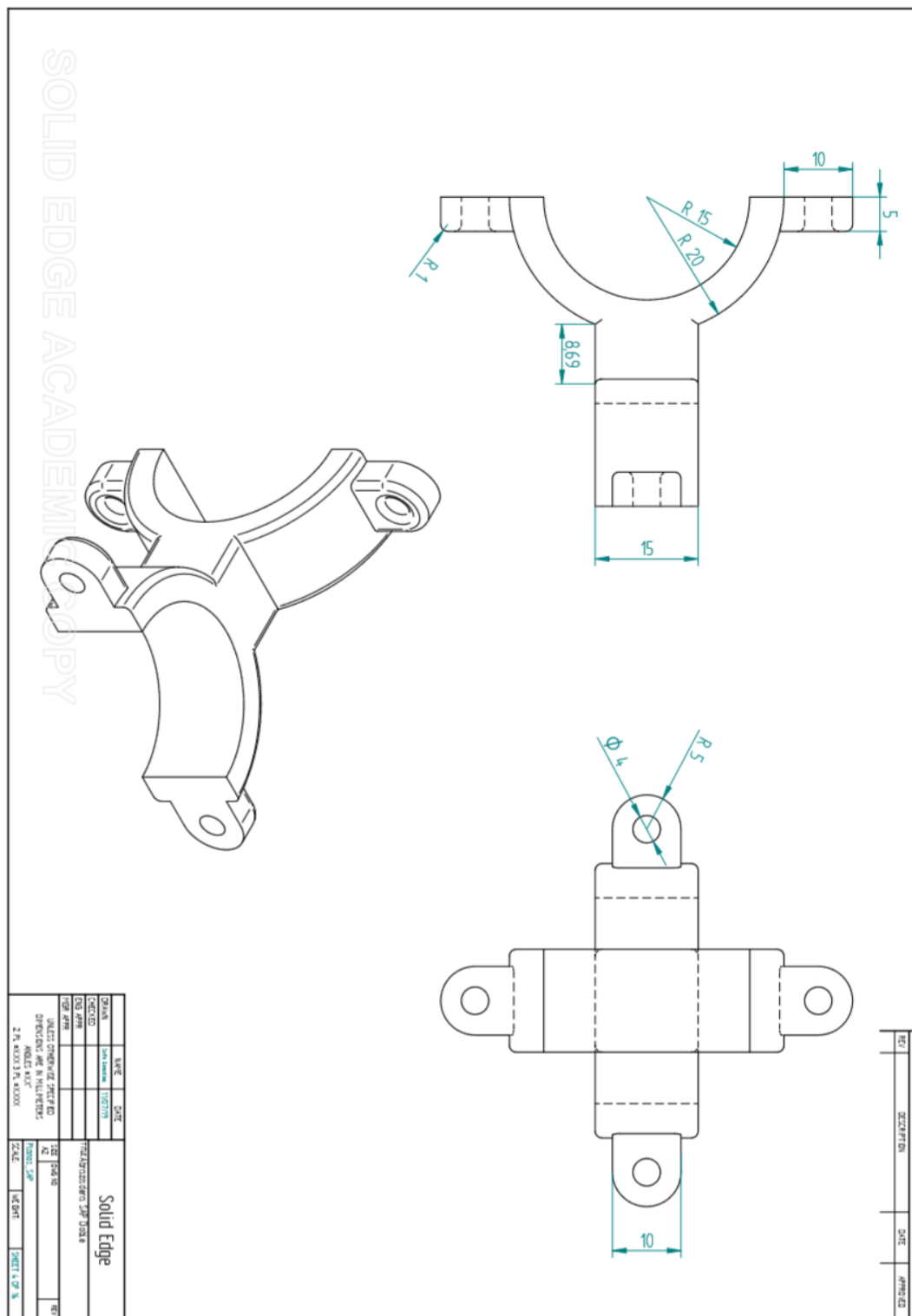
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Abrazadera SAP-SRM trasera.



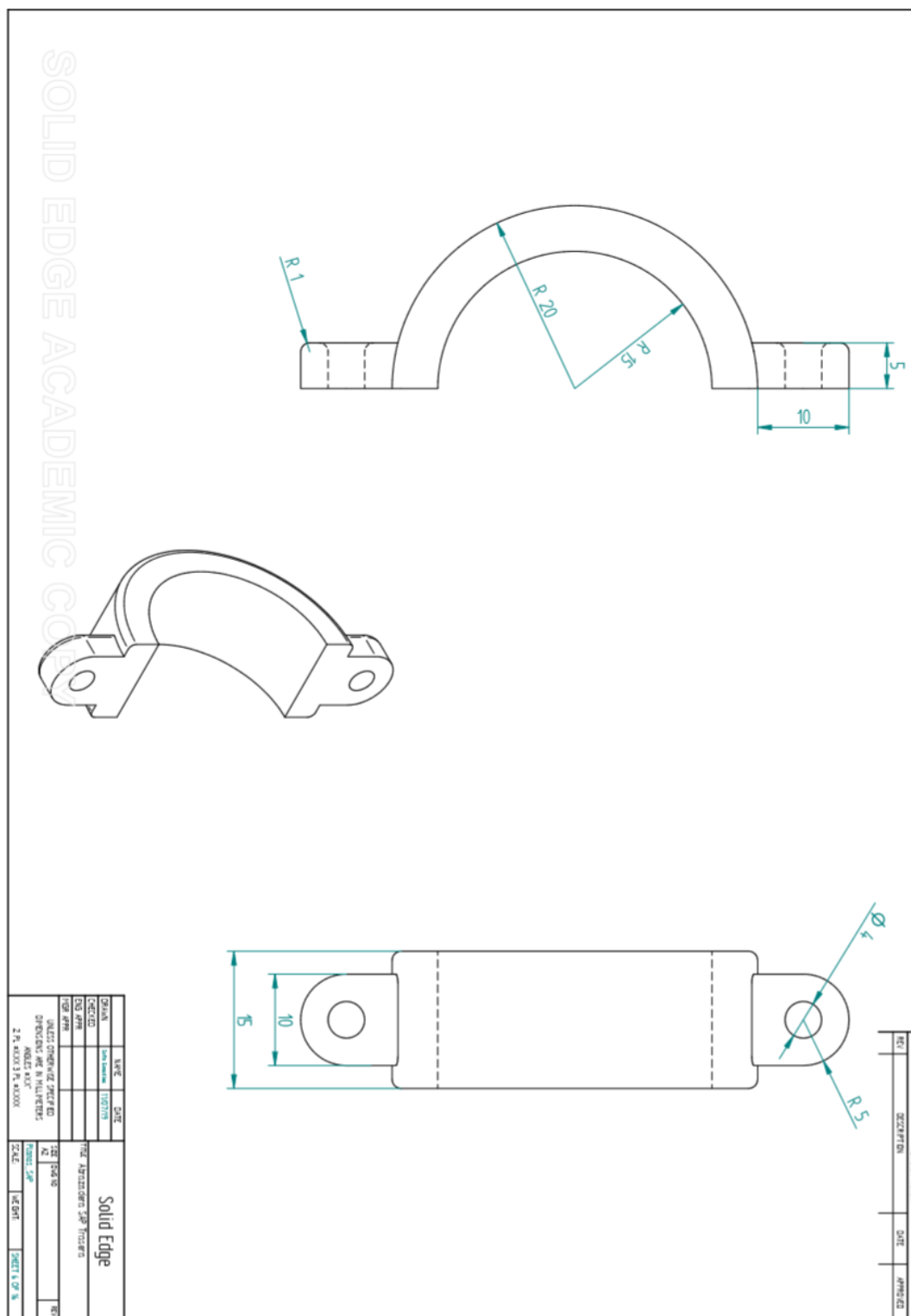
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Abrazadera doble.



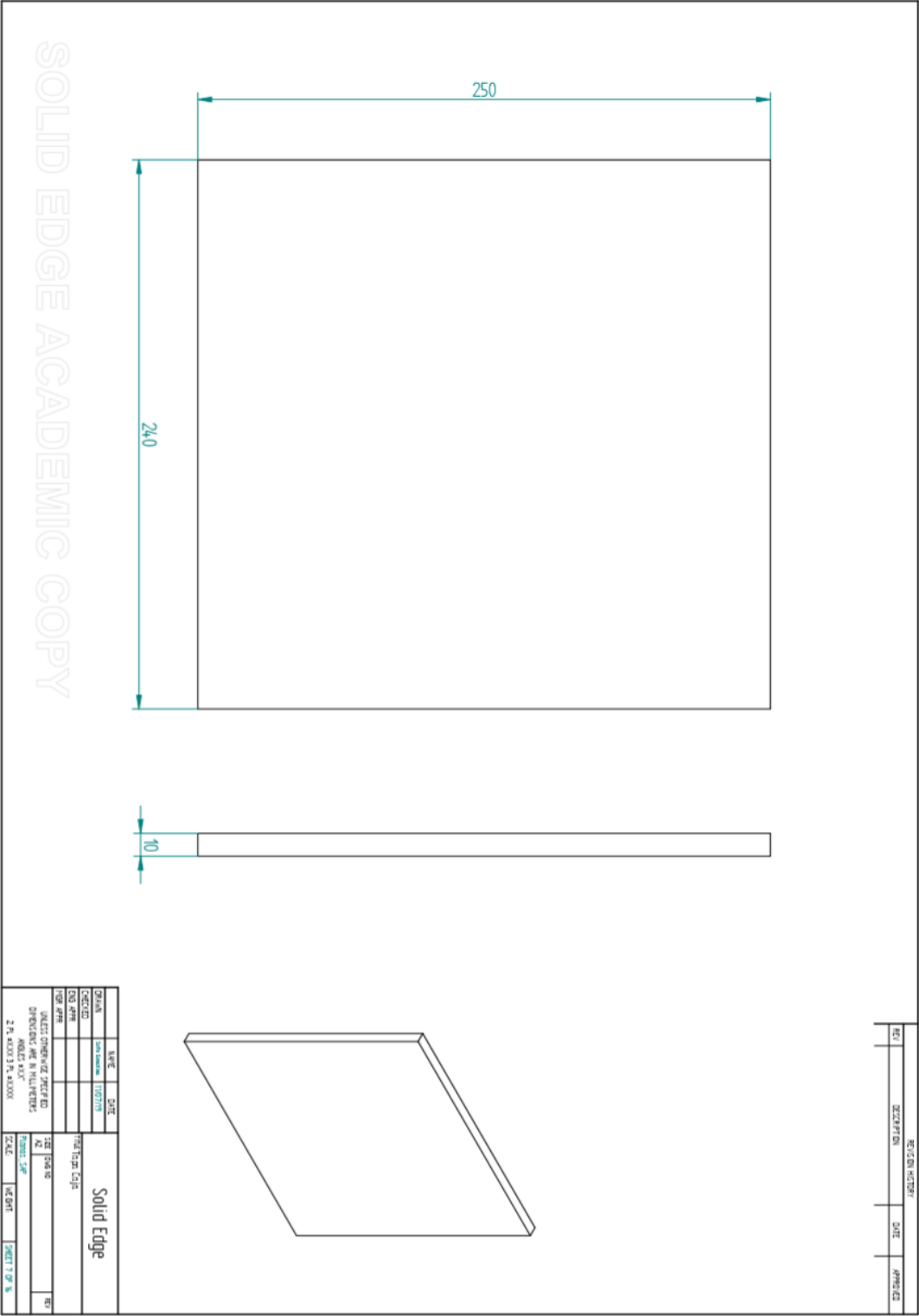
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Abrazadera doble sección trasera.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tapa Caja.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

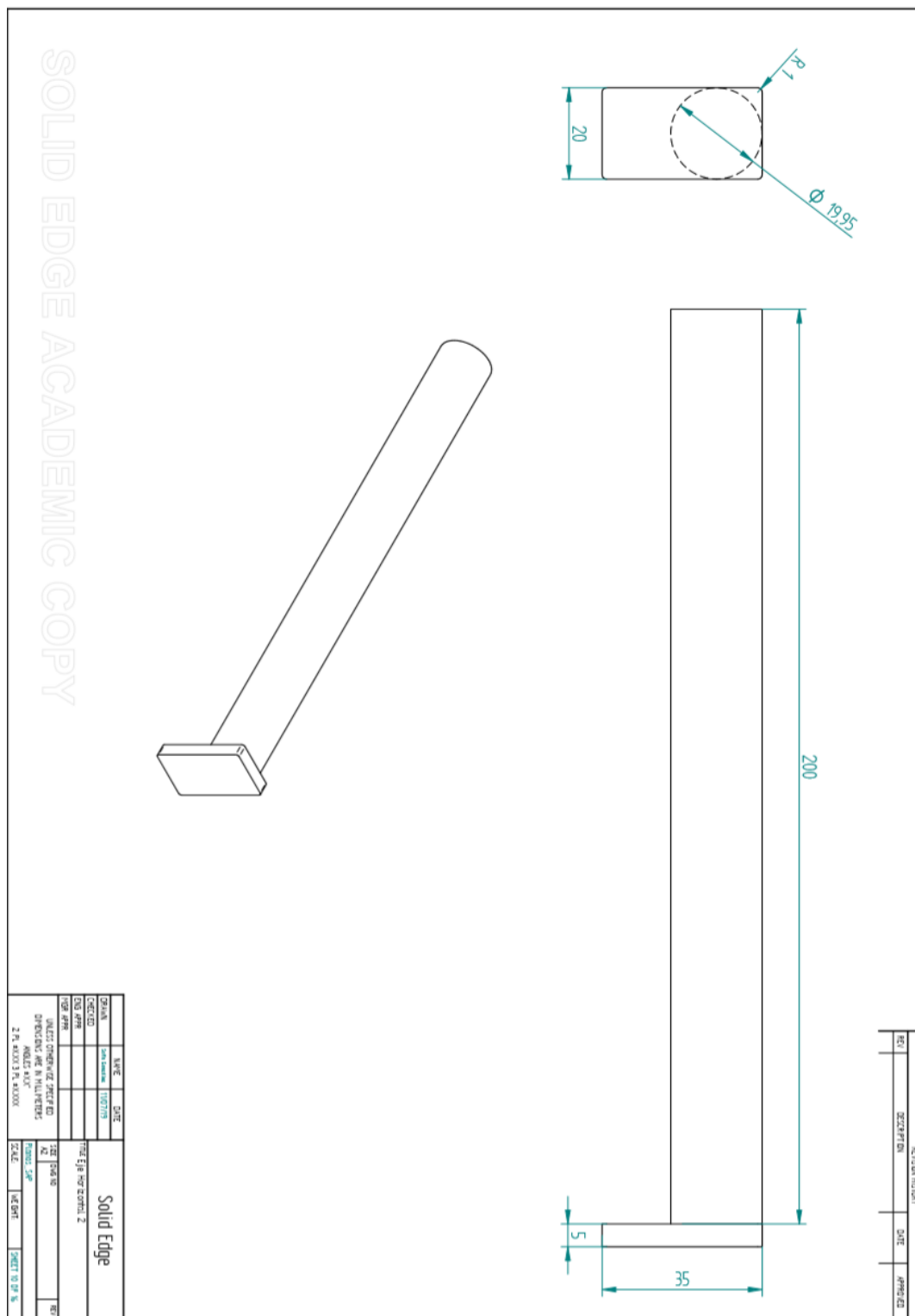


La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

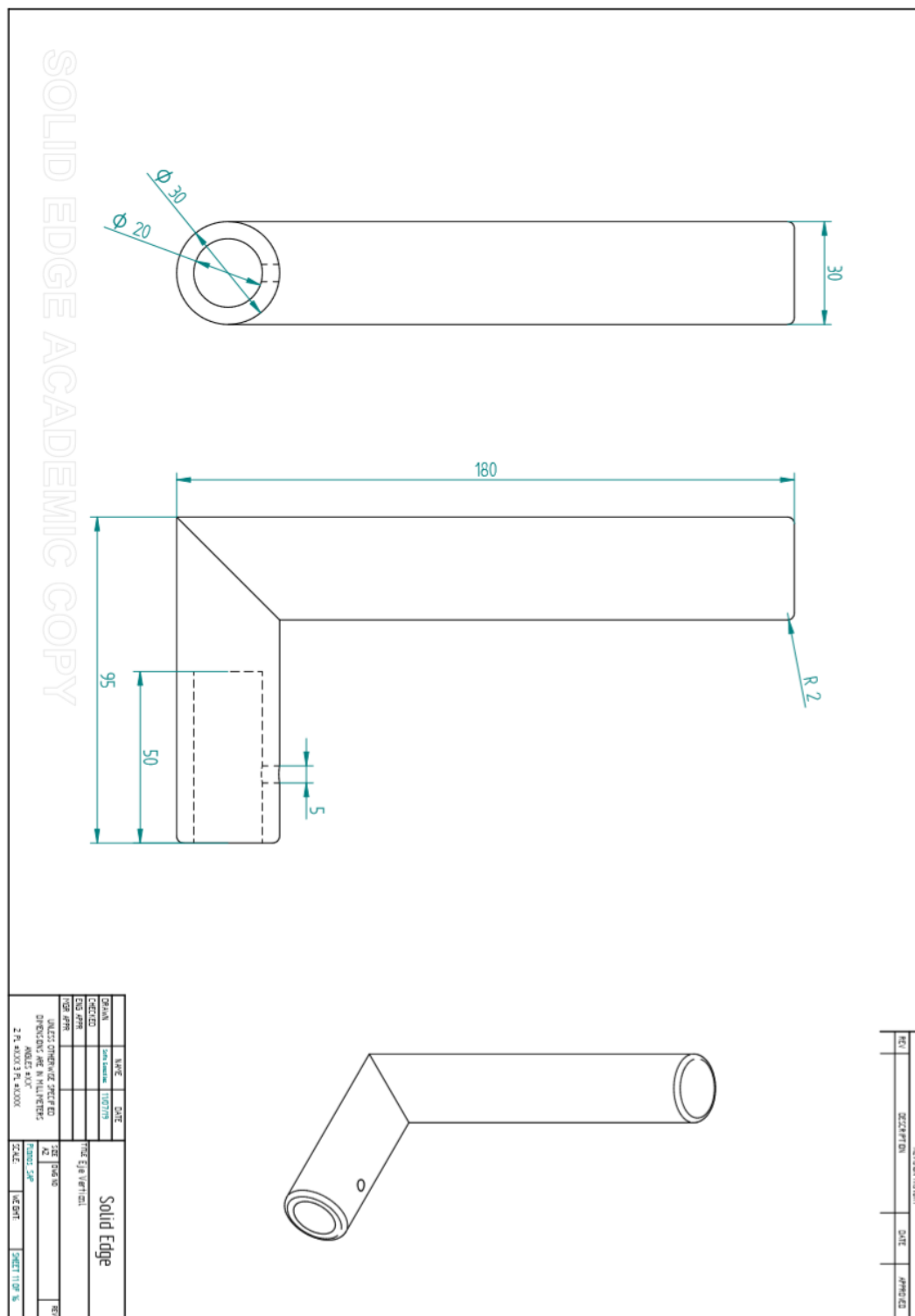
320  
270  
45  
5  
5  
30  
R 1  
Ø 30

Eje horizontal externo.



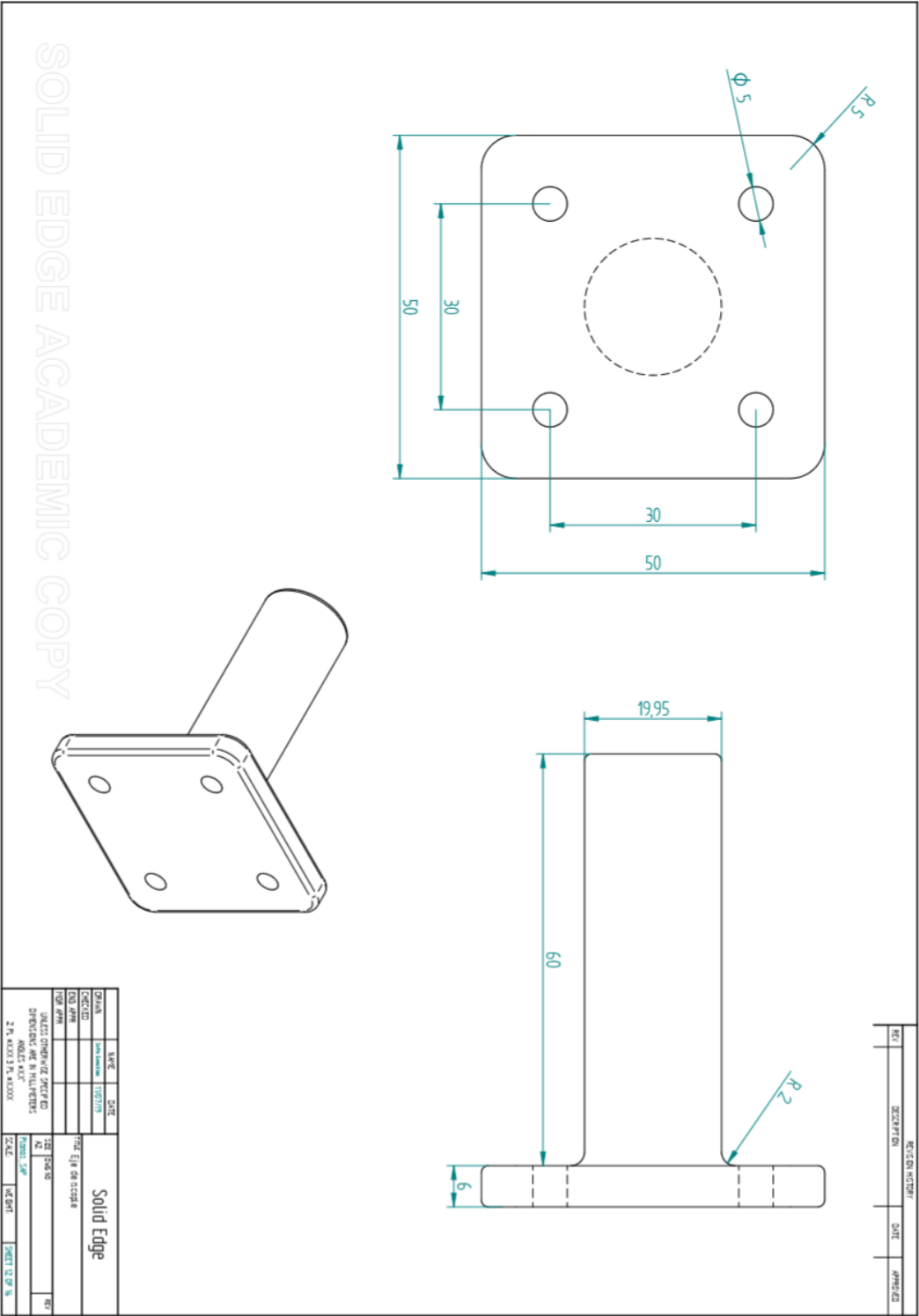
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Eje vertical.



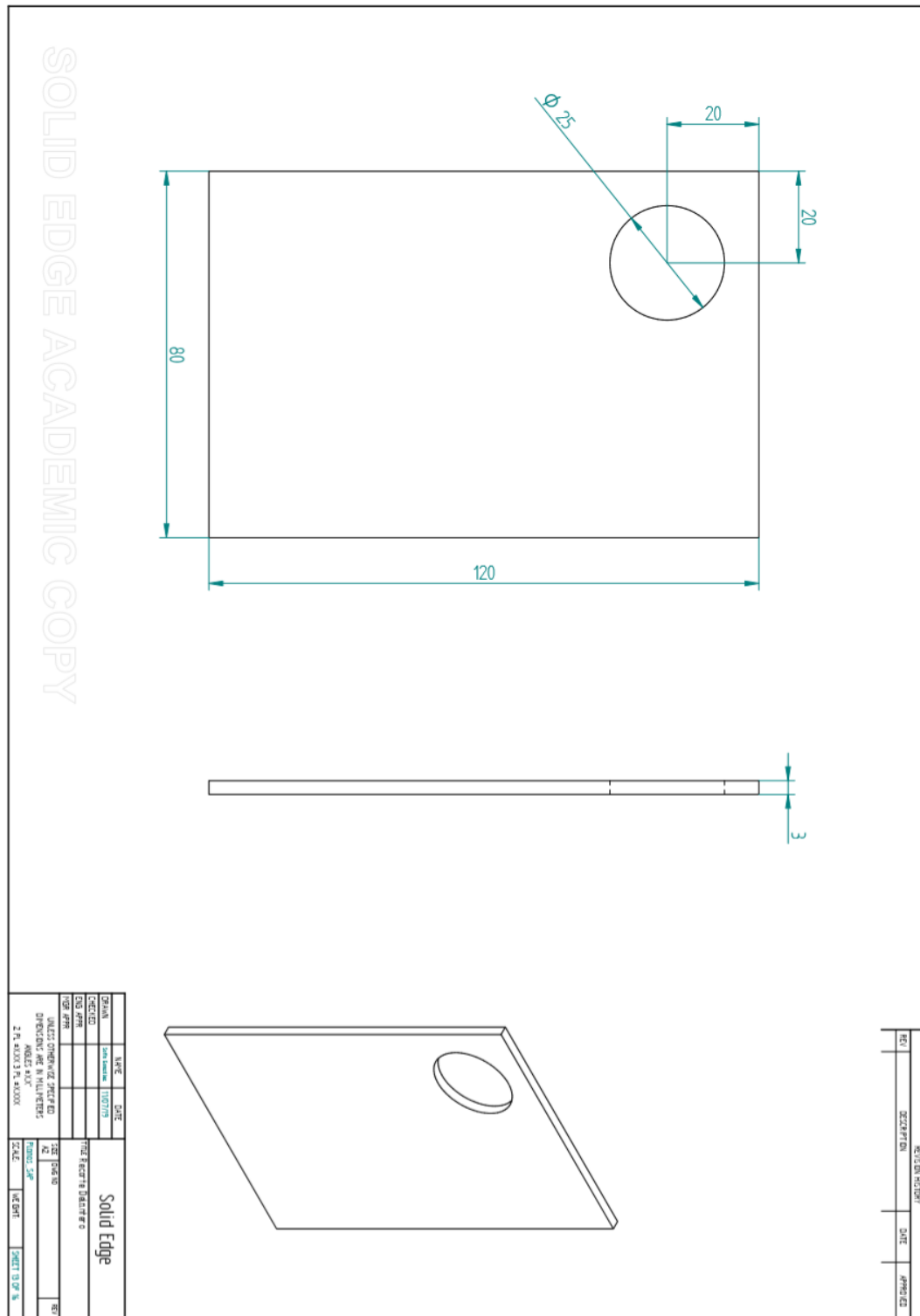
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Eje de acople.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

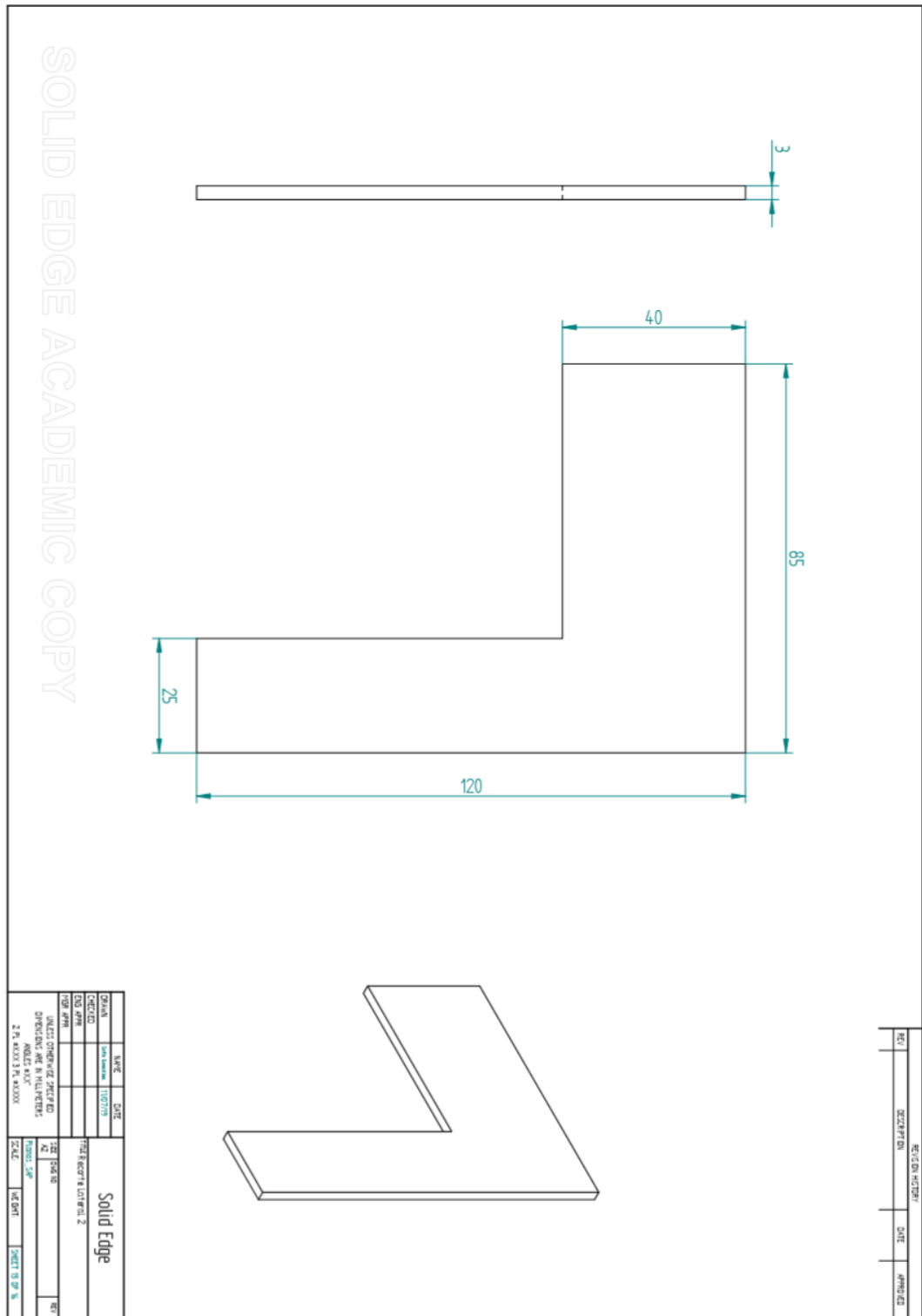
Recorte delantero.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



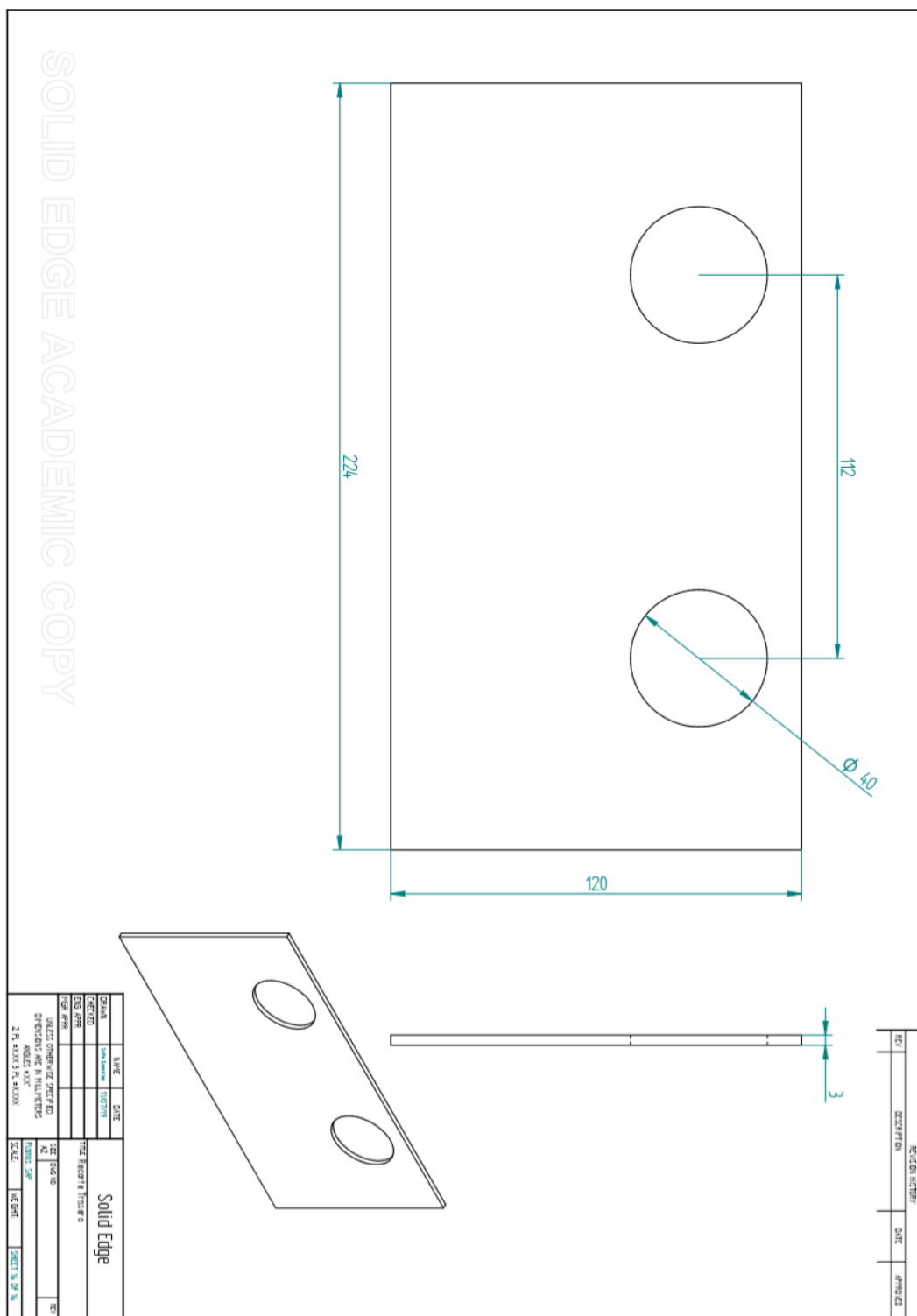
Recorte lateral 2.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Recorte trasero.



La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.